

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

Fernando Buzzulini Prioste

**DETECÇÃO E CONTROLE DE OSCILAÇÕES
ELETROMECAÑICAS USANDO SISTEMAS DE
MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Ph.D. Aguinaldo Silveira e Silva

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P958d Prioste, Fernando Buzzulini

Detecção e controle de oscilações eletromecânicas usando sistemas de medição fasorial sincronizada [tese] / Fernando Buzzulini Prioste ; orientador, Aguinaldo Silveira e Silva. - Florianópolis, SC, 2011.

323 p.: il., grafs., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia elétrica. 2. Sistemas de potência. 3. Detecção de sinais. 4. Sistemas de energia elétrica - Estabilidade. I. Silva, Aguinaldo Silveira e. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU 621.3

Fernando Buzzulini Prioste


**DETECÇÃO E CONTROLE DE OSCILAÇÕES
ELETROMECAÑICAS USANDO SISTEMAS DE
MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.
Florianópolis, 07/10/2011.

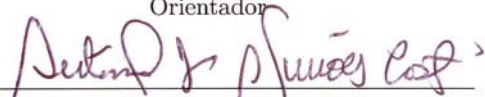


Patrick Kuo-Peng, D.Sc.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Aginaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Orientador



Antônio José Alves Simões Costa, Ph.D., UFSC



Francisco Damasceno Freitas, Dr., UnB



Glauco Nery Taranto, Ph.D., UFRJ



Ubirajara Franco Moreno, Dr., UFSC

LISTA DE FIGURAS

2.1	Classificação de Estabilidade de Sistemas de Potência [1].	41
3.1	Sistema Interligado Nacional & SMFS - Baixa Tensão. . .	55
4.1	DESA 1 Aplicado em Sinal sem Amortecimento.	121
4.2	Energia do Sinal sem Amortecimento via DESA 1.	121
4.3	Apli	122
4.4	DESA 1 Aplicado em Sinal $X_1(t)$ com Amortecimento Polinomial.	133
4.5	Energia e $dE(t)/dt$ do Sinal $X_1(t)$ com Amortecimento Polinomial - DESA 1.	133
4.6	Amortecimento Real e Estimado do Sinal $X_1(t)$ - DESA 1.	133
4.7	DESA 1 Aplicado em Sinal $X_2(t)$ com Amortecimento Senoidal.	134
4.8	Energia e $dE(t)/dt$ do Sinal $X_2(t)$ com Amortecimento Senoidal - DESA 1.	134
4.9	Amortecimento Real e Estimado do Sinal $X_2(t)$ - DESA 1.	134
4.10	DESA 1 Aplicado em Sinal FM $X_3(t)$ com Amortecimento Nulo.	135
4.11	Energia e $dE(t)/dt$ do Sinal FM $X_3(t)$ com Amortecimento Nulo - DESA 1.	135
4.12	Amortecimento Real e Estimado do Sinal FM $X_3(t)$ - DESA 1.	135
4.13	DESA 1 Aplicado em Sinal FM $X_4(t)$ com Amortecimento Constante.	136
4.14	Energia e $dE(t)/dt$ do Sinal FM $X_4(t)$ com Amortecimento Constante - DESA 1.	136
4.15	Amortecimento Real e Estimado do Sinal FM $X_4(t)$ - DESA 1.	136
4.16	Frequência Instantânea do Sinal FM $X_4(t)$ com Amortecimento Constante - DESA 1.	137
4.17	Energias Instantânea Média e Instantânea do Sinal FM $X_4(t)$ com Amortecimento Constante - DESA 1.	137
4.18	Transformada de Hilbert Aplicada ao Sinal $X_1(t)$ com Amortecimento Polinomial.	139
4.19	Amortecimento Real e Estimado do Sinal $X_1(t)$ - Amortecimento Polinomial - TH.	140
4.20	Transformada de Hilbert Aplicada ao Sinal $X_2(t)$ - com Amortecimento Senoidal.	141

4.21	Amortecimento Real e Estimado do Sinal $X_2(t)$ com Amortecimento Senoidal - TH.	141
4.22	Transformada de Hilbert Aplicada ao Sinal FM $X_4(t)$ com Amortecimento Constante.	142
4.23	Amortecimento Real e Estimado do Sinal FM $X_4(t)$ - TH - “end effects”.	143
4.24	Amortecimento Real e Estimado do Sinal FM $X_4(t)$ - TH.	143
4.25	Comparações Entre Amortecimentos - TH Versus TKEO - Sinal FM $X_4(t)$	144
4.26	Comparações da FI Obtida Via TKEO Versus TH - Sinal FM $X_4(t)$	144
4.27	a) Sinal Original; b) <i>Chirp Signal</i> ; c) Sinal Corrompido.	154
4.28	Sinal Corrompido.	155
4.29	Interpolações Cúbicas de Máximos e Mínimos Locais. ...	155
4.30	Interpolações Cúbicas de Máximos e Mínimos Locais e sua Média.	155
4.31	a) Interpolações Cúbicas e sua Média; b) Média Subtraída do Sinal Corrompido - Resíduo ou PIMF1.	156
4.32	a) Máximos, Mínimos e Média Local; b) Resíduo ou PIMF2.	156
4.33	a) Máximos, Mínimos e Média Local da IMF1; b) Resíduo da IMF1.	157
4.34	Decomposição do Sinal Corrompido em Diversas IMFs. .	157
5.1	Fluxograma do Algoritmo de Monitoração de Modos Eletromecânicos.	178
6.1	Sistema Teste de Duas Áreas.	188
6.2	Variações de Frequência dos Geradores para os Dados de Ambiente.	194
6.3	Monitoramento do Modo Inter-área - Modelo Não-linear.	198
6.4	Monitoramento do Modo Inter-área - Modelo Linear. ...	199
6.5	Optional caption for list of figures	200
6.6	Monitoramento dos Modos Locais - Modelo Não-linear. .	202
6.7	Monitoramento dos Modos Locais - Modelo Linear.	203
6.8	Optional caption for list of figures	204
6.9	Optional caption	205
6.10	Variações de Potência Mecânica - Redespacho e Atuação CAG.	206
6.11	Monitoramento do Modo Inter-área - Redespacho e Atuação do CAG.	207

6.12	Monitoramento do Modo Local - Redespacho e Atuação do CAG.	208
6.13	Decomposição do Sinal em IMFs - EEMD.....	210
6.14	Resultado das Análises Usando a THH e a TTH.	211
6.15	Resultado do Influência do Tamanho das Janelas Análises da THH e da TTH.....	212
6.16	Sinais Analisados - Sistema LPV1.....	216
6.17	Frequência Modal - LPV1, $(\lambda_{1,2})$	216
6.18	Amortecimento Modal - LPV1, $(\lambda_{1,2})$	217
6.19	Frequência Modal - LPV2, $(\lambda_{1,2})$	217
6.20	Amortecimento Modal - LPV2, $(\lambda_{1,2})$	218
6.21	Frequência Modal do Modo de 0,61Hz - LPV2, $(\lambda_{3,4})$	219
6.22	Amortecimento Modal de 16,4% - LPV2, $(\lambda_{3,4})$	220
6.23	Frequência do SIN.	221
6.24	Frequência Modal - Modo Norte-Sul.....	224
6.25	Amortecimento Modal - Modo Norte-Sul.....	224
6.26	Diferença Angular - Norte-Sul.	225
6.27	Frequência Modal - Modo Sul-Sudeste.	226
6.28	Amortecimento Modal - Modo Sul-Sudeste.	227
6.29	Variações de Frequência no SIN Durante Ocorrências - Regiões Norte e Sudeste.	230
6.30	Optional caption for list of figures	233
6.31	Optional caption for list of figures	235
6.32	Optional caption for list of figures	236
6.33	Tomada de Carga na Região Nordeste.	237
6.34	Optional caption for list of figures	238
6.35	Optional caption for list of figures	240
6.36	Optional caption for list of figures	241
6.37	Optional caption for list of figures	243
6.38	Optional caption for list of figures	244
6.39	Optional caption for list of figures	246
6.40	Optional caption for list of figures	247
6.41	Optional caption for list of figures	248
7.1	Região de \mathcal{D} -Estabilidade.	261
7.2	Sistema Teste - Equivalente do Sistema Sul-Sudeste Brasileiro.	272
7.3	Estrutura de Controle Centralizado.	273
7.4	Estrutura de Controle Descentralizado.....	274

7.5	Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ sem e com PSS.	277
7.6	Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ Controle Centralizado e Descentralizado.	277
7.7	Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ Controle Centralizado, Descentralizado e com PSS.	278
7.8	Variações Angulares para Abertura de LT 1-5 - Controle Centralizado e Descentralizado.	279
7.9	Variações Angulares para Abertura de LT 1-5 - Controle Centralizado e com PSS.	279
7.10	Variações Angulares do Gerador 2: perda da LT 2 – 5. ..	288
7.11	Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 2 – 5. ..	288
7.12	Variações Angulares do Gerador 1: perda da LT 6 – 7. ..	289
7.13	Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 6 – 7. ..	289
7.14	Variações Angulares do Gerador 2: perda da LT 6 – 7 e perda da LT 6 – 7 seguida pela perda do sinal de Itaipu. .	290
7.15	Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 6 – 7 e perda da LT 6 – 7 seguida pela perda do sinal de Itaipu. .	290

LISTA DE TABELAS

3.1	Legendas para a Localização das PMUs e do PDC.	54
4.1	Ponderações de N4SID, MOESP e CVA - Caso com entradas $U \neq 0$	105
4.2	Ponderações de N4SID, MOESP e CVA - Caso com entradas $U = 0$	105
4.3	Comparações entre as Transformadas de Fourier, Wavelet e de Huang (EMD).	148
5.1	Principais Modos Interárea do Sistema Interligado Nacional.	169
5.2	Especificações dos filtros elípticos utilizados.	169
6.1	Autovalores do sistema linearizado.	188
6.2	Identificação das janelas de dados.	189
6.3	Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso sem filtro e sem carga dinâmica.	191
6.4	Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso sem filtro e sem carga dinâmica.	191
6.5	Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso com filtro e sem carga dinâmica.	192
6.6	Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso com filtro e sem carga dinâmica.	192
6.7	Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso com filtro e com carga dinâmica.	193
6.8	Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso com filtro e com carga dinâmica.	193
6.9	Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 2. Caso com filtro e com carga dinâmica.	193
6.10	Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 3. Caso com filtro e com carga dinâmica.	195
6.11	Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 4. Caso com filtro e com carga dinâmica.	195
6.12	Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 5. Caso com filtro e com carga dinâmica.	195
6.13	Principais Modos Inter-área do Sistema Interligado Nacional.	214
6.14	Autovalores do Sistema Teste.	215
6.15	Identificação das janelas.	220

6.16	Identificação dos Modos Dominantes e Dominância Modal Relativa. Janela 1	222
6.17	Dominância Modal Relativa para Diferenças Angulares UFPA(N1)-UFSC(S2) & UNIFEI(SE2)-UFSC(S2). Janela 1	222
6.18	Dominância Modal Relativa para Frequências UFPA(N1) & UFSC(S2) e UNIFEI(SE2) & UFSC(S2). Janela 1	222
6.19	Identificação das Janelas - <i>Blackout</i> no Nordeste.	232
6.20	Sequência de Eventos - Janela 3.	239
6.21	Autovalores Identificados - Ocorrência 1. Janela 1	241
6.22	Autovalores Identificados - Ocorrência 2. Janela 3	242
7.1	Modos Eletromecânicos (sem PSS)	273
7.2	Modos Eletromecânicos (com PSS)	273
7.3	Modos Eletromecânicos do Sistema Teste.	275
7.4	Modos Eletromecânicos do Sistema Teste - Controle Centralizado (LQR).....	275
7.5	Modos Eletromecânicos do Sistema Teste - Controle Descentralizado (LQR).	276
7.6	Caso Base: Autovalores e Mode Shapes	285
7.7	Caso 1: Autovalores e Mode Shapes	286
7.8	Caso 2: Autovalores e Mode Shapes	286

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

AI - Amplitude Instantânea
AM - Amplitude Modulada
ANATEM - Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos
AR - Modelo auto-regressivo (autoregressive model)
ARMA - Modelo auto-regressivo, de média móvel (autoregressive moving average model)
ARMAX - Modelo auto-regressivo, de média móvel com entradas exógenas (autoregressive moving average model with exogenous inputs)
ARX - Modelo auto-regressivo com entradas exógenas (autoregressive model with exogenous inputs)
ASRAM - Algoritmo de subespaço para rastreamento automático de modos
BFGS - Método de otimização para solução de problemas de otimização não-linear Broyden - Fletcher - Goldfarb - Shanno, ou algoritmo Quase Newton
BP - Filtro passa banda (Band-pass filter)
CAG - Controle automático de geração
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CDU - Controlador definido pelo usuário
COA - Centro de ângulo (center of angle)
COS - Centro de operação do sistema
CVA - Algoritmo de subespaço Canonical Variate Analysis
DESA - Algoritmo de separação de energia discreto (Discret Energy Separation Algorithms)
DFT - Transformada de Fourier discreta (Discrete Fourier Transform)
EEMD - (Ensemble Empirical Mode Decomposition)
EMD - Decomposição modal empírica (Empirical Mode Decomposition)
ERA - (Eigen System Realization Algorithm)
ERAC - Esquema regional de alívio de carga
FACTS - Flexible Alternating Current Transmission System
FFT - Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Trans-

form)

FI - Frequência instantânea

FIR - Resposta finita ao impulso (Finite Impulse Response)

FM - Frequência modulada

GPS - Sistema de posicionamento global (Global Positioning Systems)

GS - Controle Gain Schedule

Hifoo - Ferramenta de otimização do Matlab para projeto de controladores de ordens fixas e otimização H_∞

HP - Filtro passa alta (High-pass filter)

IDM - Índice de dominância modal

IMF - Funções modais intrínsecas (Intrinsic Mode Functions)

LMI - Inequações matriciais lineares (Linear Matrix Inequalities)

LP - Filtro passa baixa (Low-pass filter)

LPV - Sistema linear com parâmetros variantes (Linear Parameter-Varying)

LQ - Decomposição LQ

LQR - Regulador linear quadrático (Linear Quadratic Regulator)

LTI - Sistema linear invariante no tempo (Linear Time-Invariant)

LTV - Sistema linear variante no tempo (Linear Time-Varying)

MedFasee - Projeto sistema de medição fasorial sincronizada com aplicações em sistemas de energia elétrica

MFS - Medição fasorial sincronizada

MIMO - Sistema multientradas, multisaídas (multi-input, multi-output)

MOESP - Algoritmo de subespaço Multivariable Output-Error State Space

MSI - Índice de mode shapes (mode shape index)

N4SID - Algoritmo de subespaço Numerical Algorithms for Subspace State Space System Identification

ONS - Operador Nacional do Sistema

PacDyn - Programa de Análise de Estabilidade de Pequeno

nas Perturbações

PDC - Concentrador de dados (Phasor data concentrator)

PEM - Métodos de erro de predição (Prediction Error Methods)

PIMF - Proto função modal intrínseca (Proto Intrinsic Mode Function)

PMU - Unidade de medição fasorial (Phasor Measurement Unit)

PPS - Perda de proteção de sincronismo

PSS ou ESP - Estabilizador de sistemas de potência (Power System Stabilizer)

QR - Decomposição QR

RLMS - Mínimos quadrados robusto (Robust Least Mean Square)

Se - Subestação

SeDuMi - Ferramenta de otimização do Matlab (Self-Dual-Minimisation package)

SEP - Sistema elétrico de potência

SIN - Sistema interligado nacional

SISO - Sistema com uma entrada e uma saída (single-input, single-output)

SMFS - Sistemas de medição fasorial sincronizada

STFT - Short Time Fourier Transform

SVD - Decomposição em valores singulares (Singular Value Decomposition)

TH - Transformada de Hilbert

THH - Transformada de Hilbert-Huang

TKEO - Operador de energia de Teager e Kaiser (Teager-Kaiser Energy Operator)

TTH - Transformada de Teager-Huang

TW - Transformada Wavelet

TWC - Transformada Wavelet Contínua

UG - Unidade geradora

UHE - Usina hidroelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	31
1.2 ESTRUTURA DA TESE	33
1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE	35
1.4 LISTA DE PUBLICAÇÕES	37
Artigo em Revista:	37
Artigos em Congressos Internacionais:	38
Artigo em Congresso Nacional:	38
2 PROBLEMA DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	39
2.1 INTRODUÇÃO	39
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	39
2.3 MODELAGEM GENÉRICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	42
2.4 ANÁLISE DA ESTABILIDADE ANGULAR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	45
2.5 CONCLUSÃO	48
3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL	49
3.1 INTRODUÇÃO	49
3.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA	49
3.2.1 PMUs	50
3.2.2 Transmissão de Dados	51
3.2.3 PDCs	53
3.3 APLICAÇÕES EM DINÂMICA E CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	54
3.3.1 Estabilidade Transitória	55
3.3.2 Estabilidade a Pequenas Perturbações	57
3.3.3 Detecção de Modos	58
3.3.4 Controle para Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas	73
3.4 COMENTÁRIOS	78
3.5 CONCLUSÕES	79
4 DETECÇÃO DE MODOS ELETROMECHANICOS	81
4.1 INTRODUÇÃO	81
4.2 O MÉTODO DE PRONY	82
4.2.1 Descrição do Método de Prony	82

4.2.2 O Método de Prony Multi-Sinais	86
4.3 O MODELO ARMA	89
4.4 ALGORITMOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SUBESPAÇO DE ESPAÇO DE ESTADOS	92
4.4.1 Teoria de Identificação de Subespaço de Espaço de Estados	92
Algoritmos de Subespaço Recursivos	106
4.5 A TRANSFORMADA DE HILBERT E A FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA	108
4.5.1 O Conceito de Frequência Instantânea	108
4.5.2 A Transformada de Hilbert	109
4.6 O OPERADOR DE ENERGIA DE TEAGER E KAISER ..	114
4.6.1 Formulação do TKEO	115
4.6.2 Proposta para o Cálculo do Amortecimento	122
4.6.3 Propriedades do TKEO	126
Aplicação das propriedades do TKEO em sinais AM- FM	127
Estimando a Energia Usando Propriedades do TKEO ..	128
4.6.4 Proposta de Cálculo do Amortecimento Usando o TKEO - Uma Extensão	130
4.6.5 Testes do Método Proposto	131
4.7 COMPARAÇÃO DA TRANSFORMADA DE HILBERT COM O TKEO COM AMORTECIMENTO	137
Comparações das Equações para Cálculo de Amorte- cimento	141
4.7.1 Considerando a Parcela FM do TKEO no Cálculo do Amortecimento	144
4.8 DECOMPOSIÇÕES MODAIS	146
4.8.1 Filtros	148
4.8.2 Transformadas Wavelet	149
4.8.3 A Decomposição Modal Empírica (EMD)	151
4.8.4 A Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)	161
4.8.5 A Transformada de Hilbert-Huang	163
4.8.6 A Transformada de Teager-Huang	164
4.8.7 Comentários	165
EMD e EEMD	165
5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO	167

5.1	CONSIDERAÇÕES NAS IMPLEMENTAÇÕES DOS ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE MODOS ELETROMECÂNICOS	167
5.2	PRÉ-TRATAMENTO DOS DADOS	168
5.3	PROPOSTA PARA ORDENAÇÃO DE AUTOVALORES ATRAVÉS DA ENERGIA MODAL	170
5.3.1	O Índice de Dominância Modal	171
5.3.2	Uso do Método de Prony em Conjunto com o IDM	173
5.3.3	Uso de Métodos de Subespaço em Conjunto com o IDM	174
5.4	PROPOSTA PARA O MONITORAMENTO CONTÍNUO DE MODOS	176
5.5	MODELAGEM DE SISTEMAS TESTE	177
5.6	REPRESENTAÇÕES DE MODELOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	180
5.6.1	Representação de Modelos Lineares	180
5.6.2	Representação de Sistemas Lineares com Parâmetros Variantes	181
5.6.3	Representação de Sistemas Não-Lineares, Não-Estacionários com Comportamento Estocástico ..	182
	Modelagem da Variação Aleatória da Carga	183
	<i>O Gerador de Números Aleatórios</i>	183
5.6.4	Comentários	185
6	DESEMPENHO DOS ALGORITMOS DE IDENTIFICAÇÃO	187
6.1	VALIDAÇÕES EM SISTEMAS TESTE	187
6.1.1	Sistema Teste	187
6.1.2	Escolha e tratamento dos dados	189
6.1.3	Resultados da Detecção de Modos	190
6.1.4	Rastreamento Contínuo de Modos do Sistema Teste	196
	Monitoramento dos Sistemas Estacionários Não-linear e Linear com Variações Aleatórias de Carga	197
	Monitoramento do Sistema Não-estacionário e Não-linear com Variações Aleatórias de Carga	201
6.1.5	Análise de Transitórios com a THH e a TTH	207
6.1.6	Conclusões	211

6.2	MONITORAMENTO CONTÍNUO DO SIN USANDO DADOS DE AMBIENTE	213
6.2.1	O Sistema Interligado Nacional	214
6.2.2	Rastreamento de Modos de Sistemas LPV	214
6.2.3	Monitoramento Automático de Modos Eletromecânicos do SIN	219
	Análise da Janela 1 - O Uso do IDM	221
	Análise da Janela 2 - Rastreamento Modal	223
	Análises das Dispersões Modais	225
6.2.4	Conclusões	227
6.3	BLACKOUT DE FEVEREIRO DE 2011 NA REGIÃO NORDESTE	228
6.3.1	Descrição do <i>Blackout</i> no Nordeste	228
6.3.2	Monitoramento do Modo Norte-Sul	231
6.3.3	Análise do Período Transitório das Ocorrências 1 e 2	239
6.3.4	Análise das Oscilações Causadas Pelo Despacho de Potência em Xingó	243
6.3.5	Conclusões	249
7	CONTROLE BASEADO EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL	251
7.1	INTRODUÇÃO	251
7.2	MÉTODOS DE PROJETO DE CONTROLADORES	251
7.2.1	Controle LQR sem e com Restrições Estruturais	252
7.2.2	Controle Via Inequações Matriciais Lineares - LMIs	254
	Realimentação de Saída	257
	Realimentação de Estados - Sistemas Diferenciais	260
7.2.3	Controle Via Otimização Não-convexa e Não-suave	262
	Projeto do Controlador	262
7.3	REALIMENTAÇÃO DE VARIÁVEIS ALGÉBRICAS E DE ESTADO	265
7.3.1	Modelos de Geradores	266
7.3.2	Estrutura do Sistema de Controle e seu Projeto	268
7.4	APLICAÇÃO DE SINAIS DE MFS EM CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA	271
7.4.1	O Sistema Teste	271
7.4.2	Análise Modal	272
7.4.3	A Estrutura do Controle	273

7.4.4 Simulações no Domínio do Tempo	276
Simulações usando Técnicas de Controle Multivariável	276
Projeto via Técnicas de Controle Robusto - LMIs	279
7.5 DETECÇÃO E CONTROLE DE OSCILAÇÕES	280
7.5.1 O Método de Controle	281
7.5.2 Identificação das Condições Críticas de Operação	282
O Método de Prony	282
7.5.3 Estimação de <i>mode shapes</i>	282
7.5.4 Identificação dos Pontos de Operação	283
O algoritmo de controle para chaveamento.....	284
7.5.5 Resultados	284
Simulações Não-lineares	287
7.5.6 Comentários	289
7.6 CONCLUSÕES.....	291
8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	293
8.1 PROPOSTAS PARA O PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA	295
Anexo A – Sistemas Lineares	319
Anexo B – Complemento de Schur e Lema de Finsler ...	323

Dedicado aos meus pais, irmãs e à Carolina.

Beyond work and love, I would add two other ingredients that give meaning to life. First, to fulfill whatever talents we are born with. However blessed we are by fate with different abilities and strengths, we should try to develop them to the fullest, rather than allow them to atrophy and decay. We all know individuals who did not fulfill the promise they showed in childhood. Many of them became haunted by the image of what they might have become. Instead of blaming fate, I think we should accept ourselves as we are and try to fulfill whatever dreams are within our capability. Second, we should try to leave the world a better place than when we entered it. As individuals, we can make a difference, whether it is to probe the secrets of Nature, to clean up the environment and work for peace and social justice, or to nurture the inquisitive, vibrant spirit of the young by being a mentor and a guide.

Michio Kaku

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre me apoiou ao longo de minha vida e carreira profissional.

À minha namorada, Carolina S. Roman, pelo carinho, atenção, incentivo, apoio e compreensão sempre.

Aos colegas e amigos que conheci ao longo de minha jornada em Florianópolis, que foram muitos, em particular aos membros do Labspot, Labplan, ONS e Departamento de Automação e Sistemas da UFSC.

A todos que foram meus professores e contribuíram para minha formação. Aos professores da Fundação Instituto Tecnológico de Osasco, que despertaram meu interesse pela área de sistemas elétricos de potência, também aos professores da Universidade Federal de Itajubá e da Universidade Federal de Santa Catarina.

Ao Professor Aguinaldo pela orientação e sugestão de um tema fascinante para pesquisa e ao Professor Ildemar pelas oportunidades oferecidas.

A Universidade Federal de Santa Catarina, ao CNPq e a FINEP pelo apoio ao longo do desenvolvimento das pesquisas.

Finalmente, agradeço aos membros da banca pelas sugestões e contribuições.

RESUMO

Neste documento são apresentadas técnicas de processamento digital de sinais com a finalidade de analisar oscilações e detectar modos eletromecânicos pouco amortecidos de sistemas elétricos de potência. Os sinais usados para a detecção de modos eletromecânicos são oriundos de sistemas teste implementados em programas de análise de estabilidade transitória e também de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), instalado na baixa tensão, que possibilita o monitoramento de todas as regiões do sistema elétrico brasileiro.

Dentre as ferramentas utilizadas para análise de sinais, estão o método de Prony e sua extensão para análise de múltiplos sinais, o modelo ARMA, o método de identificação de subespaço de espaço de estados N4SID com e sem a utilização do fator de esquecimento¹. Foi *proposta* a utilização de um índice de dominância modal (IDM) em conjunto com o método de Prony e o N4SID. O uso conjunto do IDM com os referidos métodos possibilita que a ordenação modal seja feita automaticamente e para o N4SID também permite que a monitoração contínua de modos possa ser feita de forma automática.

Também foram utilizadas as transformadas de Hilbert-Huang e a de Teager-Huang, esta última se baseia no operador de energia de Teager-Kaiser (TKEO). Uma extensão para o TKEO foi *proposta*, já que tal operador fornece apenas amplitudes e frequências instantâneas de sinais unimodais. A extensão *proposta* neste trabalho permite calcular o *amortecimento instantâneo* via o operador de energia de Teager-Kaiser. Foi provado, após manipulações, que a fórmula *proposta* para o cálculo do amortecimento instantâneo via TKEO é bastante similar à utilizada para estimar o amortecimento instantâneo quando se usa a transformada de Hilbert.

Os algoritmos de análise de sinais foram validados em sistemas teste e utilizados em análises de ocorrências reais do Sistema Interligado Nacional (SIN), cujos dados foram fornecidos pelo SMFS. Monitorações contínuas foram feitas e os principais modos inter-área puderam ser rastreados perante a presença ou não de grandes distúrbios no SIN.

Técnicas de controle multivariável foram utilizadas com a finalidade de projetar controladores centralizados para amortecer oscilações

¹ *Forgetting factor.*

eletromecânicas. Foram considerados projetos de controladores via técnicas de controle ótimo (LQR) com e sem restrições estruturais e o uso de Inequações Matriciais Lineares (LMIs) ², ambos com realimentações de saída. Na utilização de LMIs, os controladores foram projetados considerando a modelagem do sistema elétrico de potência tanto na forma de equações de estado quanto na de sistemas descritores. O projeto de controladores a partir de técnicas de otimização não-convexa também foram exploradas. Com a metodologia utilizada é possível pré-estabelecer a ordem dos controladores, que podem variar desde ganhos a polinômios com elevado grau.

Durante a síntese de controladores, foi necessário considerar a modelagem de atrasos causados pelo tempo de transmissão de dados devido a utilização de sinais remotos do SMFS de diversas regiões geograficamente distantes.

A proposta desta tese é identificar sistemas elétricos de potência a partir de dados de SMFS e, partir dos sistemas identificados, projetar controladores robustos realimentados por sinais locais e remotos de SMFS. Esta meta dificilmente pode ser atingida, ao menos no estágio atual, devido às técnicas de identificação de sistemas não serem capazes de identificar sistemas com a exatidão necessária em certas circunstâncias e ao fato que o projeto de controladores não pode ser feito em tempo hábil. Uma alternativa utilizada, que satisfaz parcialmente os objetivos, foi a aplicação de um controle tipo *Gain Schedule* (GS), onde controladores previamente projetados para diferentes condições operativas do sistema podem ser chaveados. Os chaveamentos ocorrem a partir da identificação de condições operativas do sistema, feitas por algoritmos de identificação de sistemas.

Palavras-chave: Detecção de Modos Eletromecânicos, Identificação de Sistemas, Estabilidade de Sistemas, Controle Multivariável, Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada.

² *Linear Matrix Inequalities.*

ABSTRACT

In this research digital signal processing techniques are presented in order to detect and analyze electromechanical oscillation modes in power systems. The analyzed signals, used for detecting electromechanical modes, are acquired from transient stability programs and also from a low voltage synchronized phasor measurement system (SPMS), which enables monitoring all regions of the Brazilian electric power system.

The tools used for signal analysis were the Prony method, its extension, the multi-signal Prony method, ARMA models and subspace algorithms like the N4SID, the last implemented with and without a forgetting factor. It was also *proposed* the use of a modal dominance index (MDI) together with Prony method and the N4SID. The use of MDI with the mentioned methods allows the automatic modal ranking. For the N4SID it is also possible to perform continuous modal monitoring.

The Hilbert-Huang and the Teager-Huang, based on the on the Teager-Kaiser energy operator (TKEO), transforms were also used. An extension of the TKEO, which originally allows just the calculation of instantaneous amplitudes and frequencies for monocomponent signals was *proposed*. This extension allows the calculation of the instantaneous damping via TKEO. It was also demonstrated that the *proposed* formula for damping calculation via TKEO is very similar to the one used to estimate instantaneous damping via Hilbert transform.

All the algorithms used to analyze signals were validated in test systems and after that used to analyze real data from the Brazilian Interconnected Power System (BIPS). The real data were acquired by the SPMS. The main BIPS interarea electromechanical modes were tracked continuously under ambient data with or without ringdowns.

Output feedback multivariable control techniques were used to design centralized controllers to damp electromechanical oscillations. Among the used control techniques are the Linear Quadratic Regulator (LQR) with or without structural restrictions and Linear Matrix Inequalities (LMIs). LMI techniques were used to design controllers for power systems in state-space and also in descriptor systems form. The design of controllers using nonsmooth optimization techniques were also explored. With these methods it is possible to preset the controllers

order, which may vary from static gains to dynamic controllers.

The SPMS signal transmission time delay was considered during the control design to account the transmission data time.

The thesis purpose is to identify critical electromechanical oscillations through SPMS analysis, then design robust controllers after the identification. This is currently a hard task since identification techniques are not able to identify systems with precision all the time, and also due to the computational burden involved in the control design that also implies in a time delay. An alternative way, used in this work, to circumvent those problems was the Gain Schedule control. In the Gain Schedule control, a set of controllers is designed for several critical situations. When one of these situations is detected, the controller corresponding to the detected operating point is switched.

Keywords: Electromechanical Mode Detection, System Identification, System Stability, Multivariable Control, Synchronized Phasor Measurement.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde o surgimento dos primeiros geradores elétricos e sistemas de transmissão, os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) vêm passando por diversas transformações, sejam elas devido ao avanço tecnológico ou restrições econômicas e ambientais.

Durante décadas, o crescimento do número de unidades geradoras e do sistema de transmissão fez com que surgisse um número de interligações cada vez maior. As interligações têm como uma das finalidades básicas minimizar indisponibilidade de energia elétrica aos consumidores, permitindo a exportação ou importação de energia elétrica de regiões onde existe excesso ou déficit temporário de energia elétrica.

Interligações em número crescente conectam desde pequenas áreas dentro de um país até regiões em diferentes países, aumentando cada vez mais a complexidade dos sistemas, fazendo com que novos desafios surjam e com isto exigindo o emprego de novas tecnologias.

Os sistemas de potência sofrem problemas operacionais causados por oscilações pouco amortecidas, sendo que as mesmas estão relacionadas, de forma geral, ao emprego de reguladores de tensão com baixas constantes de tempo e elevados ganhos, além da topologia e nível de carregamento do sistema. As interligações dos sistemas de potência fazem com que as oscilações eletromecânicas passem a atingir regiões cada vez maiores do sistema e podem vir a ocasionar grandes *blackouts*, se não amortecidas devidamente.

Uma das soluções para eliminar as oscilações pouco amortecidas é o emprego de equipamentos capazes de fornecer amortecimento ao sistema. A utilização de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESPs) adicionados ao sistema de excitação das máquinas síncronas é uma das alternativas mais eficientes e baratas para amortecer oscilações eletromecânicas. Outras fontes de amortecimento empregadas ao sistema são os dispositivos *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS) e elos de corrente contínua.

O desenvolvimento tecnológico das últimas décadas vem possibilitando a criação e o emprego de novas técnicas capazes de fornecer informações sobre o sistema de maneira rápida e precisa, o que abriu

espaço para a utilização de informações recebidas à longa distância. Uma tecnologia que vem sendo aplicada recentemente no cenário mundial chama atenção por abranger vários aspectos operacionais dos SEP com versatilidade e é conhecida como Medição Fasorial Sincronizada.

A utilização de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) em sistemas de potência vem possibilitando o emprego em conjunto de várias técnicas que até poucos anos atrás não podiam ser empregadas ou, em alguns casos, empregadas somente em casos muito restritos. Dentre as aplicações pode-se citar seu uso para monitorar e aumentar a segurança operativa de SEP, realizando o rastreamento de modos eletromecânicos e utilizando controladores realimentados por sinais remotos, possibilitando a utilização de novas técnicas para melhoria do problema de estabilidade a pequenas perturbações.

A velocidade de transmissão de dados amostrados pelo SMFS aliada ao emprego de técnicas de identificação de sistemas, torna possível a detecção de modos eletromecânicos pouco amortecidos em um curto intervalo de tempo, conhecido como tempo quase real. A utilização destes algoritmos permite que o rastreamento dos pólos dominantes possa ser feito em tempo quase real nos Centros de Operação do Sistema (COS). Logo, medidas corretivas/preventivas podem ser tomadas pelo operador do sistema a fim de evitar o aumento das oscilações. Uma das vantagens da identificação de sistemas de potência a partir dos sinais do SMFS é que o sistema identificado possui uma dimensão muito inferior à do sistema real, preservando ainda as mesmas características dinâmicas.

A utilização de sinais remotos em controladores locais ou centralizados também passa a ser factível, sendo que o uso de sinais locais em conjunto com os sinais remotos fornece mais informações sobre o sistema. Isto possibilita que os controladores sejam mais eficazes que os controladores convencionais.

Uma extensão natural da idéia para o amortecimento de oscilações é o emprego de técnicas de identificação de sistemas em conjunto com técnicas de controle utilizando informações de SMFS. O emprego conjunto destas técnicas e de SMFS possibilita que, após a identificação de determinadas condições críticas no sistema, controladores sejam acionados a fim de minimizar as oscilações pouco amortecidas, evitando a perda de estabilidade. Como o sistema identificado é de ordem reduzida, existe a possibilidade de aplicação de técnicas para projetar controladores logo após a identificação, mas para isto, primeiramente,

é necessário que o sistema seja identificado com exatidão e avaliar quais técnicas de controle podem ser aplicadas. O controlador projetado a partir de um sistema identificado pode usar sinais locais e remotos de SMFS como realimentação. Devido à sua adaptabilidade a cada situação, o controlador é capaz de melhorar o desempenho dinâmico do sistema frente às mais inesperadas situações.

Esta tese tem como objetivos avaliar e propor algoritmos para serem empregados na detecção e controle de modos eletromecânicos de SEP a partir do uso de sinais de SMFS. O objetivo mais ambicioso desta tese é propor métodos capazes de identificar modos pouco amortecidos em tempo quase real e, a partir da identificação, utilizar técnicas de controle multivariável para o amortecimento de oscilações eletromecânicas usando dados de SMFS.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

- **Capítulo 2:** *Problema de Estabilidade de Sistemas de Potência:* A classificação de fenômenos dinâmicos de sistemas elétricos de potência é apresentada. Em seguida a esta classificação a modelagem genérica de SEP é apresentada, sendo assim possível conhecer as estruturas em que os sistemas elétricos de potência podem ser representados. Após a apresentação da estrutura de modelos genéricos, técnicas clássicas empregadas na avaliação e melhoria da estabilidade angular são apresentadas seguida de um breve histórico de como se vem lidando com este problema.
- **Capítulo 3:** *Sistemas de Medição Fasorial:* Apresenta-se a origem dos sistemas de medição fasorial sincronizada (SMFS) e seus principais componentes. Uma breve descrição sobre o sistema de medição fasorial sincronizada instalado na baixa tensão, e que atualmente monitora todas as regiões do Brasil é feita. Ênfase é dada ao emprego de SMFS na melhoria do comportamento dinâmico de sistemas elétricos de potência. Estruturas de controladores que podem utilizar sinais de SMFS são apresentadas, juntamente com uma revisão das técnicas de identificação de sistemas que apresentam potencial para detectar modos eletromecânicos do sistema. As principais técnicas de controle para amortecimento de oscilações que vêm sendo empregadas e que usam sinais do SMFS na realimentação são apresentadas.

- **Capítulo 4:** *Métodos de Detecção de Modos Eletromecânicos:* Neste capítulo são apresentados e descritos em detalhe os métodos e algoritmos utilizados para detecção de modos nesta tese. Inicia-se pelo método de Prony e Prony multi-sinais, apresenta-se o modelo ARMA, algoritmos de subespaço de espaço de estados têm suas fundamentações explicadas. Em seguida é definido o conceito de frequência instantânea e métodos que possibilitam estimar tal grandeza são apresentados, dentre eles a Transformada de Hilbert e o Operador de Energia de Teager-Kaiser (TKEO). Neste capítulo também é *proposta* uma extensão do uso do TKEO, onde se *propõe* uma equação que possibilita estimar o amortecimento instantâneo de sinais utilizando grandezas estimadas pelo TKEO. É demonstrado que a equação proposta é bastante similar à utilizada para estimar o amortecimento instantâneo quando se usa a Transformada de Hilbert. Na sequência são apresentadas formas capazes de decompor sinais que contem várias componentes modais em diversos sinais unimodais, dando ênfase à Decomposição Modal Empírica.
- **Capítulo 5:** *Aplicações dos Métodos de Identificação:* Neste capítulo são apresentadas considerações sobre a aplicação dos métodos e algoritmos de identificação apresentados no Capítulo 4. É feita uma proposta de *utilização* de um índice de dominância modal (IDM) para ordenação de autovalores identificados através de suas respectivas energias modais. É *proposto* um algoritmo capaz de rastrear automaticamente modos eletromecânicos de forma contínua. Algumas formas de representação de modelos matemáticos de sistemas de potência são apresentadas. Dentre as modelagens são *propostos* o uso de sistemas lineares com parâmetros variantes (sistemas LPV) para emular não-estacionariedades em sistemas e também uma modelagem de carga dinâmica com parcelas que variam aleatoriamente no programa ANATEM.
- **Capítulo 6:** *Análise e Desempenho dos Métodos e Algoritmos de Identificação de Modos de Oscilação:* Neste capítulo, os métodos apresentados, *estendidos e propostos* são testados. A validação e o desempenho dos algoritmos de identificação é feita em sistemas teste lineares, lineares com parâmetros variantes no tempo, sistemas não-lineares e sistemas não-lineares e não-estacionários. Após as análises nos sistemas teste, os algoritmos são utilizados

para detecção de modos eletromecânicos no Sistema Interligado Nacional (SIN). Para isto dados de um SMFS instalado na baixa tensão são utilizados.

- **Capítulo 7: Controle Baseado em Sistemas de Medição Fasorial:**
- Neste capítulo técnicas de controle ótimo com e sem restrições estruturais baseadas no controle linear quadrático, juntamente com técnicas de controle robusto baseadas em inequações matriciais lineares, LMIs, são apresentadas. Estas técnicas são empregadas em conjunto com um método de controle proposto, que levou à publicação do artigo [2]. A metodologia proposta possibilita o cálculo de variáveis de estado não mensuráveis através de realimentação de determinadas variáveis algébricas do sistema, tendo como finalidade o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Os cálculos de variáveis de estado não mensuráveis são feitos em tempo real e para isto é necessário realimentar variáveis de estado e variáveis algébricas nos controladores centralizados e descentralizados. Também neste capítulo, o método de Prony multi-sinais é utilizado para calcular condições operativas críticas do sistema teste. Estas condições são identificadas a partir do cálculo de *mode shapes* e reconhecimento de padrões. A partir da detecção de uma condição operativa crítica, um controle adaptativo do tipo *Gain Schedule* é utilizado para amortecer oscilações eletromecânicas do sistema.
- **Capítulo 8: Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros :** No último capítulo, estão alguns comentários e conclusões referentes às pesquisas realizadas. Propostas para trabalhos futuros são apresentadas.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As propostas para que a detecção e o controle de oscilações eletromecânicas pudessem ser realizadas através do uso de informações de SMFS são:

- Proposta de um algoritmo nomeado Algoritmo de Subespaço para Rastreamento Automático de Modos (ASRAM), capaz de rastrear modos eletromecânicos automaticamente e de forma contínua;

- Proposta de uso do método de Prony multi-sinais em conjunto com um índice de dominância modal (IDM);
- Proposta de uma forma de cálculo de amortecimento instantâneo usando o operador de energia de Teager-Kaiser (TKEO). O TKEO, permite calcular estimativas de energia, amplitude e frequência instantâneas de sinais, com a *extensão proposta* nesta tese, é possível também estimar o amortecimento instantâneo de sinais.

Em relação a modelagens de sistemas elétricos de potência, são *propostos*:

- O uso de sistemas lineares com parâmetros variantes (sistemas LPV) para emular não-estacionariedades em sistemas elétricos de potência que pudessem ser *controladas* pelo usuário ;
- A modelagem de cargas dinâmicas com parcelas de potência nominal que variam aleatoriamente no programa ANATEM.

A partir destes modelos, os algoritmos de detecção de modos puderam ser testados e validados, possibilitando:

- Realizar detecções de modos eletromecânicos do SIN, analisando dados reais de um SMFS, que monitora todas as regiões elétricas do Brasil;
- Com o uso dos algoritmos propostos e de posse dos dados reais de um SMFS, pode-se atribuir à esta tese um *caráter pioneiro* no país em relação a detecção de modos eletromecânicos no SIN.

Em relação aos tópicos de projeto de controladores, foram exploradas:

- Técnicas de controle multivariável tipo LQR com restrições estruturais;
- Controle com realimentação de saídas com variáveis de estado e algébricas;
- Técnicas de controle multivariável, via LMIs, considerando o projeto de controladores nas formas de espaço de estados e de sistemas descritores;

- Técnicas de controle multivariável via realimentação de saídas utilizando otimização não-convexa e não suave, que possibilitam a obtenção de controladores estáticos e dinâmicos;
- Modelagem e consideração dos efeitos de atrasos do sistema de transmissão de dados de SMFS na síntese de controladores multivariáveis centralizados;

Para a realização da detecção de modos seguida pela atuação de controladores capazes de amortecer oscilações críticas identificadas, foi proposto:

- Uso do controle multivariável adaptativo tipo *Gain Schedule*;
- Identificar os pontos de operação do sistema elétrico de potência através da detecção dos modos de oscilação e de seus respectivos *mode shapes*;
- Chavear o controle tipo *Gain Schedule* para uma condição de projeto que amortece oscilações críticas identificadas pelos métodos de identificação utilizados na tese.

1.4 LISTA DE PUBLICAÇÕES

Alguns resultados obtidos ao longo deste doutorado, que englobam detecção de modos e controle usando dados de SMFS, foram publicados em:

Artigo em Revista:

1. Decker, I. C. ; e Silva, A. S. ; Agostini, Marcelo N. ; Prioste, Fernando B. ; Mayer, Breno T. ; Dotta, Daniel - (2010). *Experience and Applications of Phasor Measurements to the Brazilian Interconnected Power System.*, **European Transactions on Electrical Power**, url = <http://dx.doi.org/10.1002/etep.537>, doi = 10.1002/etep.537

Artigos em Congressos Internacionais:

1. Decker, I. C. ; Silva, A. S. ; Prioste, F. B. ; Agostini, M. N. ; Dotta, D. - 2011. *Experience of WAMS Development and Applications in Brazil*, **Power System Computation Conference**
2. Prioste, F.B. ; Silva, A. ; Decker, I.C. - 2011. *Monitoring Oscillation Modes of the Brazilian Interconnected Power System Using Ambient Data* , **PowerTech, 2011 IEEE Trondheim**, doi=10.1109/PTC.2011.6019317 ,
3. Decker, I.C. ; e Silva, A.S. ; da Silva, R.J.G. ; Agostini, M.N. ; Martins, N. ; Prioste, F.B. - 2010. *System Wide Model Validation of the Brazilian Interconnected Power System*, **Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE**, doi=10.1109/PES.2010.5590023, ISSN=1944-9925
4. Prioste, F. B. ; Silva, A. S. ; Decker, I. C. - 2009. *Power system control based on the identification of oscillation modes*. **Power-Tech, 2009 IEEE Bucharest**, doi=10.1109/PTC.2009.5281957,
5. Prioste, F. B. ; Silva, A. S. ; Decker, I. C. - 2009. *Identificação de Oscilações Eletromecânicas a partir de Dados de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada*. **Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission, Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission**, ISBN=978-85-64689-00-8
6. Prioste, F. B. ; Silva, A. S. - 2007. *Power system small-signal stability improvement by feedback of state and algebraic variables*. **Power Tech, 2007 IEEE Lausanne**, doi=10.1109/PCT.2007.4538344

Artigo em Congresso Nacional:

1. Prioste, F. B. ; Silva, A. S. ; Decker, I. C. - 2010. *Avaliação de Métodos de Identificação de Modos Eletromecânicos em Sistemas Elétricos de Potência*. **CBA, 2010 Congresso Brasileiro de Automática**.

2 PROBLEMA DE ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

Um dos requisitos para o funcionamento de sistemas elétricos de potência é a garantia de estabilidade. Para assegurar não só a estabilidade, mas também fazer com que seu desempenho dinâmico seja aceitável, os SEP têm sido objeto de estudo e pesquisa há várias décadas. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, equipamentos e técnicas de análise vêm surgindo ou são aprimoradas de tempos em tempos, o que muitas vezes faz com que diversas áreas do conhecimento devam ser aplicadas em conjunto.

Neste capítulo fala-se sobre o problema da estabilidade de sistemas de potência, enfatizando a necessidade de classificação de fenômenos que podem levá-los a estados de operação instáveis. Também comenta-se sobre modelagem de SEP, alguns métodos usados para análise de estabilidade e do potencial de aplicação do SMFS na melhoria do desempenho dinâmico de SEP.

2.2 CLASSIFICAÇÃO DA DINÂMICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os SEP são representados por uma variedade de elementos que são interligados e formam uns dos mais complexos sistemas dinâmicos existentes criados pelo homem. Composto pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição, possibilita a transmissão de energia elétrica por vastas regiões geográficas e devido a estas conexões, uma variedade de interações dinâmicas é possível. Algumas delas afetam somente alguns elementos, outras alguns fragmentos ou áreas do sistema e algumas podem afetar o sistema como um todo.

Fenômenos dinâmicos apresentam particularidades e podem ser divididos em grupos caracterizados tanto por sua causa, conseqüência, tempo de duração, características físicas e local de ocorrência.

Quando ocorrem distúrbios, cada elemento do sistema responde de acordo com a dinâmica associada à sua escala de constante de tempo. As escalas de constante de tempo variam desde as respostas dinâmicas mais rápidas às mais lentas. Fenômenos como o de propagação de

ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão são os mais rápidos, seguidos por fenômenos eletromagnéticos que ocorrem nas máquinas e geradores, depois por fenômenos eletromecânicos, chegando finalmente a fenômenos bastante lentos das mais variadas origens.

Os efeitos associados a fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas são originados principalmente por operações de chaveamentos e surtos de onda causados pela incidência de raios. Sua duração estende-se de microsegundos a milisegundos.

Fenômenos bem mais lentos que os de propagação de ondas eletromagnéticas são os que ocorrem nos estatores das máquinas síncronas, que estão conectadas ao sistema de transmissão. A escala de tempo destes fenômenos varia de milisegundos podendo chegar a valores da ordem de um segundo.

Os fenômenos eletromecânicos, que são os de interesse no presente trabalho, estão associados às oscilações das massas girantes dos geradores ligados às respectivas máquinas motrizes ou primárias, ou seja, às turbinas. Cargas dinâmicas representadas por motores também influenciam o seu comportamento. A escala de tempo destes fenômenos varia de valores em torno de um segundo, chegando a valores próximos a 20 segundos.

Dinâmicas mais lentas são originadas por diversos fatores. Em alguns casos, podem estar associadas às escalas de tempo de resposta de fenômenos termodinâmicos que ocorrem, por exemplo, em caldeiras. Também, nesta escala de tempo se enquadra a atuação de controladores tais como o Controle Automático de Geração (CAG), que está associado ao balanço carga-geração do sistema a fim de manter a frequência próxima da nominal. A escala de tempo destes tipos de fenômenos varia de minutos a horas.

Os SEP podem ser representados tanto por conjuntos de equações diferenciais não-lineares quanto por conjunto de equações algébrico-diferenciais que modelam, de acordo com cada tipo de estudo, cada um de seus componentes.

Como todo sistema dinâmico, os SEP estão sujeitos a diversos tipos de perturbações, podendo originar os mais variados tipos de oscilações com as mais variadas amplitudes, que podem ainda fazer com que o sistema não atinja um novo ponto de equilíbrio estável.

A definição e classificação da estabilidade de SEP vem sendo discutidas e padronizadas ao longo da evolução dos mesmos. Esta atuação torna-se necessária, pois com o crescimento do número de in-

terligações, uso de novas tecnologias e controladores, que associados a condições de operação de estresse, ocasionam o surgimento de novos tipos de fenômenos capazes de instabilizá-los.

A razão para se definir diversos tipos de estabilidade é a de possibilitar sua identificação e melhor entendimento e caracterização para que as devidas medidas de controle possam ser tomadas a fim de evitá-las. Na Figura 2.1 resumem-se, em classes, os tipos de estabilidade de sistemas de potência [1].

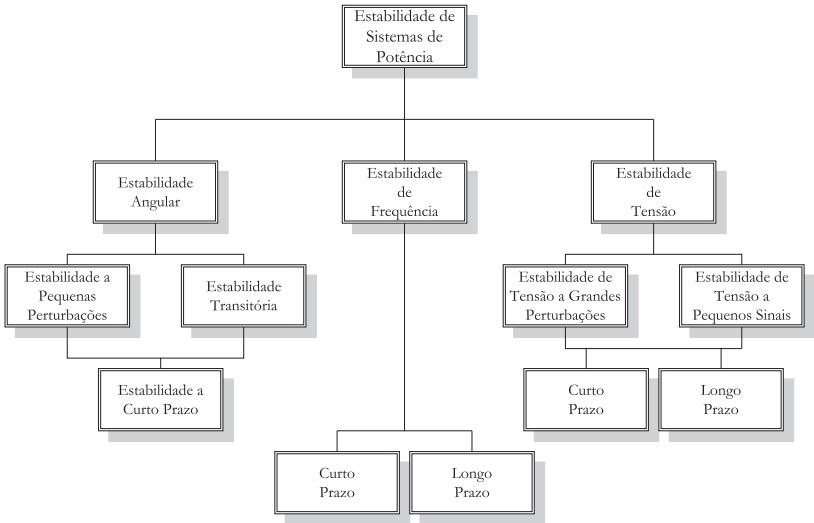


Figura 2.1: Classificação de Estabilidade de Sistemas de Potência [1].

A estabilidade angular está dividida em duas subcategorias:

- Estabilidade a Pequenos Sinais;
- Estabilidade Transitória.

Tanto a estabilidade a pequenos sinais quanto a transitória fazem parte de fenômenos de curta duração, conforme a Figura 2.1.

A estabilidade a pequenos sinais está relacionada à capacidade do sistema de potência manter o sincronismo quando submetido a pequenos distúrbios. Tais distúrbios são considerados pequenos o suficiente para que uma análise do sistema linearizado possa ser feita.

Os problemas de estabilidade angular a pequenos sinais estão relacionados a oscilações pouco amortecidas originando modos em frequências específicas que subdividem-se em ¹:

- *Modos Intraplanta*: estão relacionados a oscilações entre máquinas da mesma usina, com faixa de frequência da ordem de 2 a 2,5 Hz. Estes modos geralmente são bem amortecidos;
- *Modos Locais*: envolvem uma pequena parte do sistema, sendo portanto um problema local. Um exemplo é o caso de uma única máquina oscilando contra o resto das máquinas da mesma área ou do sistema, com frequências na faixa de 1 a 2 Hz ;
- *Modos Interárea*: envolvem conjuntos de máquinas que oscilam contra um ou mais grupos de máquinas do sistema, com frequências que variam de 0,2 a 1 Hz. Este é um problema global em que o carregamento do sistema tem influência relevante nos modos.

O fenômeno de estabilidade transitória está relacionado à capacidade do sistema permanecer estável, mantendo o seu sincronismo mesmo após sofrer um distúrbio de grande magnitude. Devido às grandes excursões nas variações angulares e demais variáveis de estado, torna-se necessário que a sua análise seja feita considerando o conjunto de equações não-lineares do sistema. Além de depender das condições operativas do sistema, este fenômeno sofre grande influência da magnitude do distúrbio.

Estabilidade de tensão e de frequência não são abordados neste documento. Detalhes sobre estes tópicos podem ser encontrados em [1] e em suas referências.

2.3 MODELAGEM GENÉRICA DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Os sistemas elétricos de potência são representados por conjuntos de equações diferenciais não-lineares da forma das equações (2.1a) e (2.1b), sendo a equação (2.1c) a equação que representa as saídas do sistema.

$$\dot{x} = f(t, x, z, u) \quad (2.1a)$$

¹Ainda podem existir os modos de controle e os torcionais, que não são objetos deste trabalho. Detalhes a este respeito podem ser encontrados em [3]

$$\dot{z} = g(t, x, z, u) \quad (2.1b)$$

$$y = h(t, x, z, u) \quad (2.1c)$$

onde $x \in \mathbb{R}^n$, $z \in \mathbb{R}^m$, $u \in \mathbb{R}^p$ e $y \in \mathbb{R}^q$ são os vetores de variáveis de estado, variáveis algébricas, de entradas e saídas, respectivamente, e t representa o tempo.

Supondo que o conjunto de equações diferenciais (2.1b) represente somente as equações que modelam a rede elétrica e as equações dos estatores das máquinas, que apresentam constantes de tempo muito pequenas, o esforço computacional para se obter tais soluções numéricas é elevado, exigindo passo de integração em torno de 10 vezes menor que a menor constante de tempo de (2.1b). Isto inviabiliza simulações tanto para sistemas de grande porte quanto por períodos de tempo da ordem de alguns segundos. Assim, usualmente os termos que envolvem derivadas de componentes que representam a rede elétrica e o estator das máquinas são desprezados, por representarem transitórios rápidos ², sem que alterações significativas ocorram nas respostas dinâmicas do sistema.

O conjunto de equações (2.1b) pode ser transformado em um conjunto de equações algébricas $0 = g(t, x, z, u)$, formando assim um conjunto de equações algébrico-diferenciais.

Um SEP pode então ser representado através de conjuntos de equações algébrico-diferenciais não-lineares, sendo que cada um deles deve ser utilizado de acordo com a necessidade de se observar os transitórios de maior interesse.

Quando a variável z é isolada em $0 = g(t, x, z, u)$ e substituída em (2.1a), tem-se um sistema na forma de (2.2),

$$\dot{x} = f(t, x, H(t, x), u) \quad (2.2)$$

Com estes artifícios aplicados, o custo computacional para análise do comportamento de (2.2) pode ser drasticamente reduzido, permitindo ainda que os fenômenos eletromecânicos possam ser analisados com boa precisão.

²Este procedimento pode ser justificado pela teoria das perturbações singulares, que separa conjuntos de variáveis através de suas respectivas escalas de constante de tempo e postula que no horizonte de tempo de interesse, as variáveis rápidas já tenham atingido o regime permanente [4].

Quando se deseja analisar a estabilidade dos SEP em regiões próximas de determinados pontos de operação, uma das técnicas mais utilizadas é a *linearização analítica* do conjunto de equações algébrico-diferenciais, que ainda possibilita a aplicação de conceitos de álgebra linear nos estudos.

O sistema usado para representar um SEP na forma de equações algébrico-diferenciais é dado por (2.3)

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, z, u) \\ 0 &= g(x, z, u) \\ y &= h(x, z, u)\end{aligned}\tag{2.3}$$

onde f e g são vetores compostos por equações diferenciais e algébricas não-lineares, respectivamente, e h é um vetor com as equações de saída, $x \in \mathbb{R}^n$, $z \in \mathbb{R}^m$, $u \in \mathbb{R}^p$ e $y \in \mathbb{R}^q$ são os vetores de variáveis de estado, variáveis algébricas, de entradas e saídas, respectivamente.

Linearizando-se o conjunto de equações (2.3) no ponto de equilíbrio $\{x_0, z_0, u_0\}$ chega-se ao conjunto de equações (2.4):

$$\begin{aligned}\Delta\dot{x} &= \frac{\partial f}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial f}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial f}{\partial u}\Delta u \\ 0 &= \frac{\partial g}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial g}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial g}{\partial u}\Delta u \\ \Delta y &= \frac{\partial h}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial h}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial h}{\partial u}\Delta u\end{aligned}\tag{2.4}$$

O conjunto de equações (2.4) também é conhecido como sistema *descriptor*, ou *singular* ou a *semi-estado* [5, 6] e é comumente descrito na forma do conjunto de equações (2.5) ³. Os termos que representam variações (Δ), a partir deste ponto, serão omitidos para simplificar a notação.

$$\begin{aligned}E\dot{x} &= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \cdot u \\ y &= \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \hat{D}u\end{aligned}\tag{2.5}$$

³A formulação de sistemas descritores é utilizada no Capítulo 7 para projeto de controladores via LMIs.

A matriz E é singular ⁴, com $0 < \text{Posto}(E) < n + m$, pois $x \in \mathbb{R}^n$ e $z \in \mathbb{R}^m$.

Quando a matriz J_4 for inversível, o vetor de variáveis algébricas Δz de (2.4) pode ser eliminado, levando o sistema algébrico-diferencial a um sistema na forma de equações diferenciais ordinárias que pode ser representado pela forma de equações de estado (2.6) ⁵.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{2.6}$$

O sistema (2.6) é uma das formas que comumente os SEP representados por (2.3) são analisados após linearização em estudos de estabilidade a pequenos sinais.

Quando se tem um sistema na forma de equações de estado, ferramentas numéricas poderosas relacionadas à álgebra linear podem ser aplicadas em sua análise, facilitando assim a avaliação do comportamento dinâmico do sistema em regiões próximas à sua condição operativa.

2.4 ANÁLISE DA ESTABILIDADE ANGULAR DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Em sistemas de potência, a estabilidade nada mais é que uma condição de equilíbrio entre forças ou torques que se opõem e tendem a acelerar ou desacelerar as máquinas do sistema umas em relação as outras. Os desequilíbrios de forças ocorrem quando existem perturbações dos mais variados tipos no sistema, que fazem com que o torque mecânico da máquina primária seja diferente em relação ao torque elétrico da respectiva máquina síncrona, originando assim aceleração ou desaceleração angular.

A análise de estabilidade angular de sistemas de potência é uma tarefa complexa, pois envolve a modelagem de diversos equipamentos que representam o sistema operando de maneira interligada e seus controladores, o que faz que sistemas não-lineares de grande porte sejam

⁴Se para um dado sistema o posto de E for igual a $n + m$, o sistema é chamado de sistema *regular*.

⁵O sistema (2.6) é um sistema *regular* com a matriz E igual à matriz identidade I .

utilizados na representação de modelos.

Técnicas para análise da estabilidade angular foram desenvolvidas nas últimas décadas e dentre elas pode-se citar o uso de métodos de integração numérica, métodos diretos de Lyapunov [7] e a análise de autovalores do SEP linearizado [8, 9].

Os autovalores são de fundamental importância na análise de estabilidade a pequenas perturbações, pois através deles é possível classificar a estabilidade dos pontos de equilíbrio de sistemas dinâmicos.

Dado um sistema na forma $\dot{x} = Ax$, a equação fundamental para o cálculo de autovalores (λ_i) e seus autovetores associados é dada por (2.7).

$$Av_i = \lambda_i v_i \quad (2.7)$$

onde v_i é um autovetor à direita da matriz de estados A .

O sistema linearizado pode ser considerado estável se todos os autovalores da matriz A pertencerem ao semi-plano esquerdo do plano complexo, ou seja $\lambda_i \in \mathbb{C}^-$.

A estabilidade de sistemas depende da condição inicial de operação (pontos de equilíbrio), que possuem um domínio de atração. A natureza (magnitude) dos distúrbios pode fazer com que as trajetórias de estado do sistema excedam os limites do domínio de atração e instabilizar o sistema. Pequenos distúrbios ocorrem à todo instante na forma de variações de carga ao longo do dia. Já os grandes distúrbios ocorrem com menor frequência e são causados, por exemplo, por aberturas de linhas de transmissão, curtos-circuitos e perdas de grandes geradores, podendo causar mudanças estruturais no sistema. Mudanças estruturais físicas também estão relacionadas ao isolamento de partes específicas do sistema, que fazem com que algumas partes passem a operar ilhadas de outras partes. Ilhamentos podem ainda originar outros tipos de instabilidade como de tensão e frequência na área isolada se nenhuma medida de correção, como alívio de carga, for tomada.

O problema de estabilidade a pequenos sinais teve uma solução baseada na abordagem proposta na década de 1960 em [10] onde os autores dividem o torque elétrico das máquinas síncronas em duas componentes: o torque de sincronização e o de amortecimento.

Oscilações pouco amortecidas e aperiódicas foram as primeiras a serem eliminadas dos sistemas de potência, que há algumas décadas operavam com a tensão de excitação constante. A sua eliminação deve-

se ao fato de ter sido constatado que atuações contínuas de reguladores de tensão de forma automática as eliminam. Estas oscilações estão associadas à falta de torque de sincronização.

Atualmente as maiores causas do surgimento de oscilações pouco amortecidas estão associadas à falta de torque de amortecimento nas máquinas síncronas.

A solução para esta questão é fornecer torque de amortecimento através de sinais estabilizantes adicionais, os quais são usados como entrada de um controlador denominado estabilizador do sistema de potência (ESP).

O sinal de saída do ESP é aplicado no regulador de tensão e se a fase deste sinal for adequadamente ajustada, um torque de amortecimento é originado.

Avanços na área de eletrônica de potência possibilitaram o surgimento dos dispositivos FACTS, que têm como uma de suas finalidades o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Estes dispositivos são controláveis e apresentam alta velocidade de resposta com grande flexibilidade de controle [11].

Os sinais tradicionalmente usados no ESP são sinais locais. Já os utilizados nos FACTS podem ser tanto locais quanto remotos, onde geralmente se dá prioridade à utilização de dados locais pela maior confiabilidade.

O emprego da MFS, que possibilita adquirir dados com alta taxa de amostragem e transmitir dados em alta velocidade, torna sua aplicação em diversas áreas do sistema de potência uma realidade, possibilitando inclusive o uso de sinais locais e remotos.

Ao serem aplicadas técnicas de processamento digital de sinais em dados de SMFS, torna-se possível também monitorar modos eletromecânicos de sistemas de potência em tempo quase real, possibilitando ações preventivas e ou corretivas de operadores do sistema. Como o sistema identificado é de ordem reduzida, torna-se viável a aplicação de técnicas de controle para amortecimento de oscilações, uma vez que os cálculos têm sido realizados com elevada velocidade. Embora não se tenha conhecimento do projeto de controladores em tempo quase real utilizando dados de um sistema identificado via sinais de MFS, vislumbra-se a aplicação destas técnicas, sendo um dos motivos de uma proposta de estudo nesta pesquisa.

2.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, faz-se uma breve revisão sobre o problema da estabilidade de SEP, mencionando as diferentes escalas de tempo de fenômenos que ocorrem nos mesmos e classificando, também, os tipos de estabilidade, dando-se ênfase a estabilidade angular.

Equações genéricas da modelagem dos SEP são apresentadas, sendo que as mesmas podem representar todos os equipamentos e controladores do sistema. Os conjuntos de equações apresentados servem tanto para a análise e simulação de sistemas não-lineares e linearizados. Estas equações servem ainda para o projeto de controladores lineares ou não-lineares.

É mencionado sobre o uso de dados de SMFS e possibilidades de aplicação em áreas como identificação de sistemas e controle, pois as mesmas apresentam grande potencial de aplicação e vêm sendo estudadas em diversos países.

Os próximos capítulos tratam sobre o SMFS e aplicações em identificação de sistemas e aplicação em controladores.

P_GEEL_TE_X.

3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL

3.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido a vários fatores, os SEP estão operando cada vez mais próximos aos seus limites de carregamento, e conseqüentemente de estabilidade, pois existem barreiras que dificultam a expansão, principalmente, do sistema de transmissão. Para tentar contornar tais empecilhos uma busca constante por novas tecnologias é perseguida.

Uma tecnologia que vem sendo aplicada recentemente no cenário mundial chama atenção por abranger vários aspectos operacionais dos SEP com versatilidade e é motivo para o estudo de sua aplicação. Esta tecnologia é a medição fasorial sincronizada, que neste capítulo tem seus principais componentes descritos, juntamente com algumas aplicações que vêm sendo usadas na melhoria da estabilidade de pequenos sinais em SEP.

São feitos breves levantamentos sobre o uso de SMFS aplicados em controle e amortecimento de oscilações eletromecânicas e uma revisão sobre a aplicação desta tecnologia na área de identificação de sistemas de potência. Na aplicação de identificação de sistemas, diversos métodos que apresentam potencial para detecção de autovalores do sistema via aquisição de dados do SMFS são apresentados. Em relação a aplicações de controle, são apresentadas somente as técnicas onde sinais de SMFS foram utilizados em sua realimentação.

3.2 SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

A Medição Fasorial Sincronizada é uma tecnologia originária da década de 1970 ¹ [12, 13] com o desenvolvimento da teoria e aplicação de relés de distância baseados em componentes simétricas. Naquela época os computadores não eram capazes de lidar com o número elevado de equações implementadas nos algoritmos dos relés de distância usados na proteção de linhas de transmissão modelados sem a utilização das componentes simétricas. Com a modelagem dos circuitos trifásicos feita com a teoria das componentes simétricas [14, 15], o número de equações

¹Apesar das idéias embrionárias terem ocorrido na década de 1970, os SMFS começaram a se difundir em meados do ano 2000.

reduziu-se e sua aplicação passou a ser viável.

O desenvolvimento dos computadores e a sua capacidade exponencial de processamento de dados fez com que a utilização das componentes simétricas em relés de distância não fosse tão relevante. Entretanto, a maneira como estes relés utilizavam métodos eficientes para medir módulos e ângulos de tensões e correntes de forma sincronizada tornou-se, com o tempo, muito atrativa para diversos tipos de aplicações. Dentre as aplicações pode-se citar: fluxo de potência e fluxo de potência ótimo, curto-circuito, estabilidade angular e de tensão, análise de contingências, estimação de estados, validação de modelos dinâmicos (identificação de sistemas), dentre outras.

Na década de 1980 os sistemas de posicionamento globais via satélite, *Global Positioning Systems* (GPSs), começavam a ser difundidos e os pesquisadores associaram o potencial do uso do tempo sincronizado dos satélites para a amostragem e envio de dados a longas distâncias, abrindo assim as portas para as aplicações da medição fasorial sincronizada em diversas áreas dos SEP, permitindo, além do envio, o cálculo de grandezas em tempo real.

Um sistema de medição fasorial sincronizada consiste em três partes principais: aquisição de dados, realizadas pelas *Phasor Measurement Units* (PMUs), a transmissão/recepção de dados e um sistema de gerenciamento e processamento de dados, o *Phasor Data Concentrator* (PDC).

3.2.1 PMUs

O primeiro protótipo de PMU foi desenvolvido no laboratório da Virgínia Tech em 1988 [13] e a partir daí a empresa *Microdyne Company* passou a produzi-las para comercialização. Atualmente várias empresas, em diversos países, produzem PMUs.

As PMUs modernas recebem sinais de um pulso por segundo (PPS) fornecidos pelo sistema de GPS. A precisão deste trem de pulsos é da ordem de $1\mu s$, o que corresponde a um erro de fase de aproximadamente $0,022^\circ$ para um sistema que opera em 60 Hz e de $0,018^\circ$ para um sistema cuja frequência nominal é de 50 Hz [16].

Recomenda-se que instalações das PMUs sejam feitas nos principais pontos do sistema, ou seja, em locais onde possam ser amostrados os fasores de tensões e correntes dos geradores e linhas de transmissão e

algumas variáveis de estado mensuráveis, ficando assim instaladas nas próprias plantas e em subestações de interesse do SEP.

Um método computacionalmente eficiente para o cálculo dos fasores via amostragem dos sinais é a Transformada Discreta de Fourier Recursiva, cujo algoritmo possibilita o cálculo de fasores constantes a partir de um sinal senoidal constante com frequência nominal [12].

Os fasores amostrados possibilitam cálculos precisos, em tempo real, dos estados do sistema se o mesmo estiver operando em uma condição de pequeno desvio em relação à frequência síncrona nominal (podendo ser chamada de regime permanente). Já em regime transitório são necessárias correções no algoritmo para que os estados sejam *calculados* com maior precisão.

Atualmente, algumas PMUs já possuem um *buffer* de memória local o que lhes permite exercer a função de um gravador digital de perturbações. Estes dados ficam armazenados por um período de tempo considerado suficiente pelo operador do sistema e geralmente são armazenados por pelo menos 14 dias [17].

Além disto, o equipamento deve possuir funções de *auto-verificação e auto-recomposição* ² para permanecer operando o máximo tempo possível, minimizando o tempo de interrupções.

Basicamente, a estrutura da PMU é composta por um sistema de aquisição - a que pertencem os filtros *anti-falseamento* ³, o circuito oscilador *Phase-Locked Oscillator* e o módulo de conversão analógica/digital; e por um microprocessador que realiza o tratamento matemático das amostras. Cada PMU deve estar acoplada a um equipamento receptor de sinal de GPS.

3.2.2 Transmissão de Dados

Os dados adquiridos pelas PMUs devem ser enviados para o concentrador de dados (PDC), que fica localizado no centro de controle do sistema. Os dados das medições sincronizadas recebidos pelas diversas PMUs espalhadas por uma vasta região geográfica são devidamente tratados no PDC e reenviados para as respectivas áreas de controle

²Auto-checking e self-healing.

³Anti-falseamento ou anti-aliasing: criação de uma falsa frequência durante o processo de amostragem, devido à uma baixa taxa de amostragem. Para se evitar este efeito, a taxa de amostragem - chamada de taxa de Nyquist, deve ser maior do que o dobro da maior componente de frequência que se deseja medir.

locais. Devido a estas versatilidades, o PDC pode ser utilizado, por exemplo, como um controle centralizado de um SEP enviando dados com pequenos atrasos, com a finalidade de amortecer oscilações pouco amortecidas. Portanto os atrasos envolvidos são discutidos aqui.

Estes sinais estão sujeitos a atrasos que têm efeito em aplicações de controle e podem variar de alguns milissegundos até alguns segundos, dependendo das distâncias e tecnologias utilizadas. Tempos de atraso por tipo de tecnologia versus distâncias geográficas podem ser encontrados em [18].

Cabos, microondas e fibras ópticas são os candidatos mais populares para serem usados em sistemas onde as distâncias entre PMUs e PDCs são pequenas, mas quando estas distâncias passam a ser significativas, como em países de dimensões continentais, os sistemas de transmissão de dados via satélite são os mais adequados devido à sua confiabilidade e cobertura geográfica. A transmissão de dados está sujeita a atrasos, que variam

Em [19], um método para cálculo de tempo de atraso em sistemas de comunicação foi publicado, onde foi proposto o uso de canais de comunicação dedicados para sinais de controle a serem utilizados em SEP. Os tempos de latência (atraso) podem ser calculados usando formulação determinística e também formulação estocástica para os canais dedicados para sistemas das mais variadas extensões geográficas. Na formulação estocástica todos os tempos de atraso envolvidos no processo são considerados como variáveis aleatórias que são funções de uma série de outras variáveis aleatórias que compõem o sistema de transmissão de dados como um todo.

O tempo de atraso encontrado via formulação determinística para um sistema com 1000 km de extensão foi de 20,7 ms, ao passo que usando-se a tecnologia de transmissão de dados via satélites que operam em órbitas mais elevadas chega a 250 ms [19].

A determinação probabilística para o mesmo caso chegou a um tempo de atraso de $20,6 \pm 4,6$ ms, sendo o desvio padrão $\sigma = 4,6$ ms. Vale lembrar que estes tempos de atraso podem atingir valores maiores ou menores se considerados maiores os intervalos da distribuição $\pm 3\sigma, \pm 4\sigma$.

Os sinais de controle transmitidos com atraso deterioram o comportamento dinâmico do sistema. Para melhorar este comportamento, são necessárias aplicações de técnicas de controle que levem em consideração, além dos diversos pontos de operação do sistema, as incertezas

nos tempos de atraso de transmissão dos sinais usados no controle.

3.2.3 PDCs

As principais funções realizadas no PDC são: coleta de dados, filtragem, processamento (cálculo e estimação de estados e parâmetros do sistema), retransmissão de sinais para as PMUs e armazenamento de dados quando ocorrem distúrbios no sistema. O PDC também deve ser capaz de lidar com dados transmitidos que contenham erros grosseiros e identificá-los.

O PDC pode ser dividido em três partes:

- Plataforma de dados, que tem como tarefa gerenciar todo tipo de software do sistema;
- A interface gráfica, que tem por finalidade disponibilizar em uma tela os dados de uma forma clara e simples para que os operadores possam interpretá-los e assim monitorar os acontecimentos no sistema;
- Sistema de armazenamento de dados históricos, que possibilita acesso aos arquivos que contenham as monitorações de algum tipo de ocorrência relevante para a segurança do sistema.

A tecnologia de gerenciamento de dados aplicada no PDC e no centro de controle é de fundamental importância no desempenho e na robustez do processo. Para isto, recomenda-se a utilização da técnica de Inteligência Artificial (IA) de sistemas Multi-Agentes [20, 21, 18], ajudando a lidar com a massa de dados e podendo servir como uma ferramenta que seleciona e analisa os dados de ocorrências mais relevantes, excluindo os demais eventos.

Para existir compatibilidade no gerenciamento de dados de sistemas de medição fasorial sincronizada cujos dispositivos são fabricados por diferentes companhias, tornou-se necessária a criação de padrões. Atualmente existem dois padrões de armazenamento de arquivos relevantes para este assunto, o *COMTRADE*, que teve sua origem no grupo de estudo SC34 [22] do *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRE) e o *SYNCHROPHASOR* [16], que se baseia no *COMTRADE* e foi criado pelo IEEE.

No Brasil a tecnologia de Medição Fasorial Sincronizada (MFS) já vem sendo aplicada no projeto MedFasee. O Projeto Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica (MedFasee) ⁴ visa basicamente o desenvolvimento de um protótipo de sistema de MFS para Sistemas de Energia Elétrica (SEEs).

Os trabalhos a serem realizados no referido projeto, envolvem pesquisa e desenvolvimento em três aspectos principais: PMUs propriamente ditas, o sistema de transmissão e concentração de dados (PDC), e as aplicações que farão uso dos dados disponíveis no PDC, auxiliando a operação e o planejamento dos SEEs.

O SMFS do projeto MedFasee está instalado na Baixa Tensão (BT) e atualmente é composto por 14 PMUs que medem sinais em tomadas. As 14 PMUs e um PDC estão instalados em Universidades brasileiras distribuídas em todas as regiões do país, desta forma consegue monitorar todas as regiões geo-elétricas do Brasil [23]. O PDC está instalado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis, e as localizações físicas das PMUs podem ser encontradas na Figura 3.1, onde as legendas utilizadas na mesma podem ser encontradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Legendas para a Localização das PMUs e do PDC.

Legenda	Universidade	Legenda	Universidade
N1	UFPA	SE1	UFMG
NE1	UFC	SE2	UNIFEI
NE2	UFPE	SE3	USP - São Carlos
NW1	UNIR	SE4	UFRJ/COPPE
M1	UnB	S1	UTFPR
W1	UFMT	S2	UFSC
SW1	UFMS	S3	UNIPAMPA

Os fasores em tempo real, medidos em cada uma das Universidades, podem ser acessados em <http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal>.

Os dados amostrados por este SMFS são utilizados no Capítulo 6 desta tese para monitorações e análises de ocorrências no SIN.

3.3 APLICAÇÕES EM DINÂMICA E CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nesta seção, são apresentadas brevemente as principais metodologia empregadas para a melhoria do comportamento dinâmico de SEP. É dada ênfase para a aplicação de sinais de SMFS em controle e

⁴(<http://www.labplan.ufsc.br/medfasee/>).

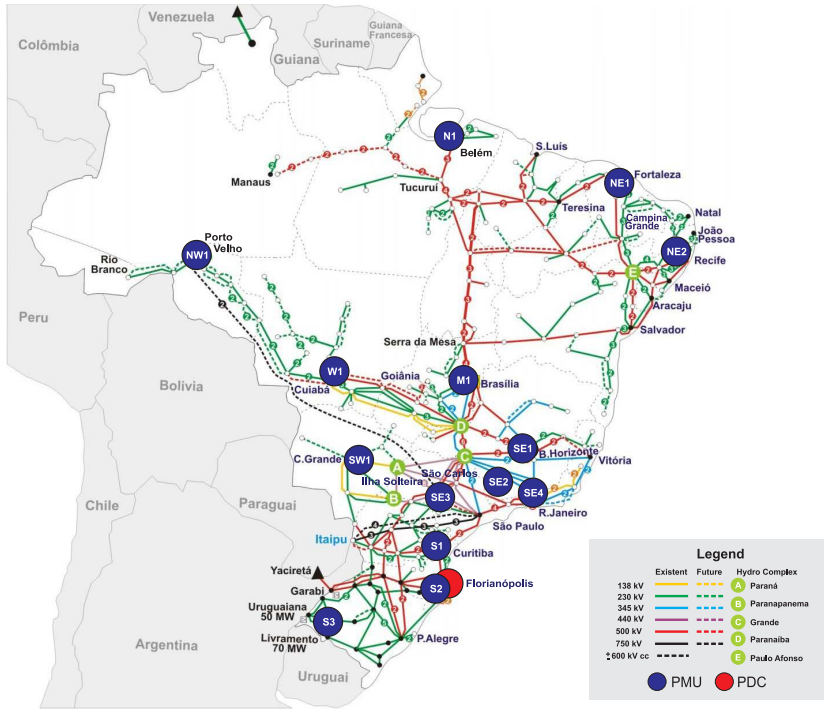


Figura 3.1: Sistema Interligado Nacional & SMFS - Baixa Tensão.
detecção de modos de SEP.

3.3.1 Estabilidade Transitória

A aplicação de técnicas de controle em estabilidade transitória pode ser dividida em duas partes: a primeira, avalia a severidade do distúrbio no sistema; a segunda está relacionada à escolha de medidas capazes de estabilizar o sistema.

O controle pode ser de dois tipos:

- **Controle preventivo:** visa realizar ações de controle para manter a operação estável do sistema caso eventuais distúrbios venham a ocorrer. Para isto, são realizadas simulações de estabilidade visando identificar os pontos críticos e o pré-estabelecimento

de ações de controle com a finalidade de melhorar o comportamento dinâmico do sistema;

- **Controle de emergência:** tem como objetivo realizar ações imediatas de controle após a detecção de ocorrências significativas no sistema.

Uma estratégia de controle preventivo para melhoria da estabilidade transitória é o uso do método SIME, sigla para *Single Machine Equivalent* em conjunto com o método de Prony [24]. Sabe-se que o método SIME é capaz de reproduzir o comportamento dinâmico de um sistema multi-máquinas em um equivalente máquina barra infinita e o método de Prony é capaz de detectar os modos pouco amortecidos do sistema máquina barra infinita. Combinando estes dois métodos, é possível prever, através de simulações, quais pontos de operação e quais defeitos podem instabilizar o sistema. Identificadas tais situações, re-despachos podem ser efetuados para manter a segurança operativa do sistema.

Geralmente a melhoria da estabilidade transitória está relacionada a alívio de geração e chaveamento de dispositivos no sistema. Para atingir este objetivo com o uso de SMFS, existem duas possibilidades: montagem de um banco de dados onde contingências pré-determinadas e ações de controle específicas são tomadas, fazendo parte do *Special Protection Systems* (SPS), ou a implantação de plataformas mais flexíveis capazes de *reagir* aos mais variados distúrbios no sistema, fazendo parte do *Wide-Area Stability and Voltage Control System* (WACS) [25]. Estes métodos enquadram-se em controle de emergência.

Em [26] usa-se o SMFS para realizar a detecção e a localização de faltas e após esta etapa, medidas de alívio de geração em determinados geradores são tomadas de acordo com simulações previamente realizadas. Estas tarefas são executadas pelo centro de operação e controle do sistema.

Também usam-se algoritmos de identificação de sistemas que analisam sinais do SMFS para a detecção de modos, monitorando e analisando o comportamento de SEP. Estas aplicações são mencionadas na Seção 3.3.3.

A validação de modelos de simulação é essencial para a representação adequada de fenômenos que ocorrem no sistema. O uso de SMFS permite um refinamento de modelos sendo que informações dinâmicas do sistema são fornecidas pelo mesmo.

3.3.2 Estabilidade a Pequenas Perturbações

Grandes SEP tipicamente apresentam múltiplos modos de oscilação inter-área, os quais estão associados com a dinâmica dos fluxos inter-área e envolvem grupos de máquinas oscilando umas contra as outras. Os dispositivos tradicionais para amortecimento destas oscilações usam na maioria das vezes sinais locais para sua realimentação, desta forma, estes controladores são empregados de forma clássica.

Com o surgimento do SMFS novas estruturas de controle podem ser aplicadas ao sistema, possibilitando o uso de técnicas de controle em sistemas descritores, realimentação de estados e de variáveis algébricas, detecção de modos em tempo quase real e a aplicação de técnicas de controle em tempo quase real. Isto é possível se as grandezas de interesse forem medidas ou estimadas. Existe também a possibilidade de se usar sinais locais e remotos e portanto amortecer adequadamente as oscilações do sistema já que estes tipos de sinais podem apresentar alta observabilidade dos modos que se deseja amortecer.

Na seqüência, serão apresentadas algumas estruturas de controle possíveis de serem implementadas fazendo-se uso de SMFS e que são usadas em estudos de estabilidade para pequenas perturbações.

- **Controle Descentralizado com Realimentação de Sinais Remotos:** Neste tipo de estrutura o controlador localiza-se junto à planta e é alimentado por sinais locais remotos. Estes sinais são processados localmente no dispositivo e um sinal de controle é gerado;
- **Controle Centralizado:** Nesta estrutura de controle, o controlador situa-se em um local central, tal como um centro de operação e é alimentado principalmente por sinais remotos. Os sinais são processados no controlador central e enviados diretamente à planta localizada remotamente;
- **Controle Hierárquico:** Este tipo de estrutura é uma combinação da atual estrutura descentralizada de controles locais com um controle central alimentado por sinais remotos.

Para que o projeto das estruturas de controle apresentadas sejam mais eficientes, usando sinais remotos (ou globais) é necessário que sejam considerados:

- atrasos na transmissão dos sinais remotos;
- utilização de métodos de projeto multivariáveis;
- robustez à perda de canais de comunicação e mudanças na configuração do sistema.

Com a implementação destas estruturas de controle, existência de diversos dispositivos capazes de amortecer oscilações, apresentados na Seção 3.3.4, SMFS e a existência de técnicas de processamento digital de sinais usadas para identificar modos dominantes do sistema, é possível se pensar em projetar um sistema de controle capaz de ser ajustado automaticamente em tempo quase real.

Para que isto possa ser feito, são necessárias técnicas de detecção de modos que amostram dados do SMFS e identifiquem um sistema de ordem reduzida que deve então ser usado em um algoritmo de ajuste de controle. O controlador pode usar sinais locais e remotos e amortecer adequadamente as oscilações do sistema.

Uma das primeiras propostas feitas com tal finalidade foi observada em [27], onde o método de Prony, Seção 4.2, é usado para detectar modos do sistema em tempo quase real sendo propostas também medidas de controle. Neste trabalho e em artigos subsequentemente publicados, utiliza-se um controle centralizado para acionar determinados dispositivos de controle no sistema.

Um dos objetivos futuros deste trabalho é desenvolver um conjunto de estruturas de detecção de modos e de controle capazes de se auto-ajustarem, em tempo quase real, de acordo com os modos de oscilação do sistema. Para isto uma revisão de métodos de identificação de sistemas e algumas técnicas de controle são apresentadas no decorrer deste documento.

3.3.3 Detecção de Modos

A monitoração em tempo quase real de sistemas a partir de informações que usam técnicas de identificação de sistemas é de grande interesse para a estabilidade do sistema, assim como para a validação de modelos e dados que são usados em estudos baseados em simulação.

Várias técnicas vêm sendo aplicadas, desenvolvidas e aprimoradas ao longo dos últimos anos. Elas são usadas em procedimentos

para monitorar e identificar modos eletromecânicos pouco amortecidos baseando-se na análise de dados coletados em campo. Neste caso, os sistemas de medição fasorial vêm contribuindo muito para esta finalidade devido à sua capacidade de amostrar dados com alta taxa de amostragem e transmiti-los a longas distâncias em pequenos intervalos de tempo.

Estimar os modos de sistemas de potência com precisão é uma tarefa difícil e problemática, devido principalmente à escolha do método mais adequado de identificação, às constantes mudanças no sistema e também devido aos processos relacionados ao custo computacional envolvido nas análises.

Nesta seção, os principais algoritmos e métodos que vêm sendo utilizados e propostos para a identificação de modos via análise de sinais amostrados por sistemas de medição fasorial sincronizada são brevemente apresentados.

Os grupos de ferramentas para a análise de sinais que estão sendo aplicados na obtenção de informações do comportamento dinâmico dos sistemas de potência podem ser classificados em:

- **Análise Espectral e de Correlação:** os modos são obtidos indiretamente e os dados são analisados no domínio da frequência;
- **Análise Paramétrica:** os modos são obtidos diretamente e os dados são analisados no domínio do tempo, através de dados amostrados.

Os algoritmos podem ainda ser subdivididos nos que utilizam blocos de dados e os recursivos.

Para os que utilizam blocos de dados, os modos são estimados via análise de cada bloco (janela) de dados e a cada janela um conjunto novo de modos é obtido. Desta forma, os modos estimados em cada janela apresentam o mesmo peso.

Os métodos recursivos utilizam dados onde os modos são estimados e atualizados a cada nova amostra considerada. A nova estimativa é obtida usando a combinação das novas amostras e de amostras usadas na estimação anterior, sendo que um *fator de esquecimento* [28] é usado para atribuir pesos menores a amostras usadas previamente.

As técnicas de identificação e modelos ainda podem ser usadas em processos de identificação determinísticos, onde respostas transitórias originadas por grandes perturbações são analisadas, ou em processos estocásticos. Em processos estocásticos os sinais analisados são

de pequena magnitude e baixa qualidade, causados por exemplo por variações aleatórias de cargas, incluindo chaveamentos no sistema e também via aplicação de sinais específicos de teste, que ainda podem ser considerados como ruídos devido às suas magnitudes.

Considerando pequenos distúrbios, um sistema de potência pode ser descrito por (3.1), onde v_L é um vetor hipotético onde variações aleatórias são usadas para representar ruídos; u_E é o vetor de entradas exógenas que serve também para representar os sinais de teste e μ pode ser usado para representar ruídos associados ao sistema de medição.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_E u_E + B_L v_L \\ y &= Cx + D_E u_E + D_L v_L + \mu \end{aligned} \quad (3.1)$$

O sistema de equações (3.1) pode ser usado para representar modelos determinísticos e estocásticos. Em modelos puramente determinísticos, v_L e μ são considerados nulos e em modelos puramente estocásticos $u_E = 0$.

Os tipos de oscilações causadas no sistema devido aos diversos tipos de perturbações mencionadas podem ser enquadrados em duas classes [29, 30], sendo elas:

- **Ringdown** ⁵, corresponde a sinais originados por variações de grande magnitude, como aberturas de linhas de transmissão, ocorrências de curto-circuitos e saídas de grandes geradores do sistema.
- **Ambient Data** ⁶, distúrbios de pequena magnitude, que ocorrem contínua e aleatoriamente no sistema, podendo ser tratados como ruídos. Nesta categoria, também se enquadram aplicações de sinais de teste que apresentam pequena magnitude e geralmente longa duração.

Um método muito utilizado na identificação de modos é o método de Prony juntamente com suas variações. Estes métodos são usados principalmente na análise de grandes distúrbios e, por terem sido implementados para análises no presente documento, serão apresentados na Seção 4.2.

⁵Este processo foi definido idealmente como resposta livre do sistema.

⁶Dados de Ambiente.

Os algoritmos utilizados para detecção de modos que vêm sendo utilizados para tal finalidade baseiam-se, em sua maioria, em modelos lineares da forma de (3.1).

Métodos de Identificação de Sistemas Puramente Estocásticos ⁷

Para a identificação de modos a partir de sinais aleatórios os algoritmos mais usados são os que incorporam os modelos *Auto-Regressive* (AR) e o *Auto-Regressive Moving-Average* (ARMA). Estes modelos são usados em processos estocásticos, pois consideram somente ruídos brancos como sendo suas respectivas entradas [32, 33].

Também foram aplicados para análise de sinais que variam aleatoriamente os métodos de identificação de sistemas baseados na identificação de subespaço de espaço de estados [34, 35], que são apresentados na Seção 4.4.

Técnicas de identificação adaptativa também foram usadas com a finalidade de identificar modos estacionários e não estacionários [36] e [37].

A grande atratividade de se monitorar modos de sistemas de potência via análise de *Dados de Ambiente* é que não é necessária a utilização de sinais de teste, que inserem distúrbios extra ao sistema, e que esta monitoração pode ser feita continuamente durante a operação normal do sistema.

A identificação de modos eletromecânicos a partir de métodos estocásticos é geralmente representada por *valores médios* e os respectivos intervalos de confiança são normalmente encontrados via simulação de Monte Carlo. A simulação de Monte Carlo é um método usado para estimar o intervalo de confiança *somente quando se tem o modelo do sistema disponível ou conhecido*. Em aplicações reais, os modelos não estão disponíveis e a repetição de experimentos uma série de vezes, pode ser impraticável por diversos motivos tais como tempo de duração e custo. No caso de sistemas de potência, além das limitações mencionadas, a aplicação da simulação de Monte Carlo em dados amostrados via SMFS torna-se impraticável, pois não se pode assumir que os sinais medidos por diversas janelas de tempo consecutivas são estacionários devido a este processo envolver intervalos de tempo cada vez maiores. Quando o tempo de análise é elevado, apesar dos dados

⁷Definição do tipo de sistema encontrada em [31].

parecerem ser estacionários, podem ocorrer alterações significativas na dinâmica do sistema, sendo elas originadas, por exemplo, por mudanças nas condições operativas do sistema.

Em [32] foi utilizado o Modelo ARMA juntamente com simulação de Monte Carlo para identificar os modos de um sistema linearizado sujeito a pequenas variações de carga (*Dados de Ambiente*). Foi constatado que quanto maiores as janelas de tempo usadas (*mais amostras*), menores eram os desvios padrões das estimativas dos modos, fazendo-os se aproximarem aos modos obtidos via linearização.

Para o sistema linearizado utilizando em [32], somente pequenas variações aleatórias foram consideradas como distúrbios. Constatou-se que o resultado médio obtido a partir da identificação de 100 simulações de Monte Carlo passa a apresentar valores mais parecidos aos do modelo de sistema linearizado a partir de janelas de tempo maiores que 5 minutos. Assim, para que a identificação de modos inter-área possam ser obtidas com uma boa precisão, sugere-se analisar janelas com duração da ordem de 30 minutos quando se utiliza o modelo ARMA ⁸.

A fim de tentar contornar a inconveniência de se usar a simulação de Monte Carlo para determinação de intervalos de confiança em dados reais obtidos via SMFS, em [33] foi utilizado o método *Bootstrap* [38, 39] junto aos modelos AR e ARMA. A idéia central deste método está relacionada a reamostragens consecutivas retiradas de distribuições independentes idênticas da *única janela de dados analisada*, a fim de estimar estatisticamente os intervalos de confiança dos modos eletromecânicos do sistema. Quando aplicado o método *Bootstrap* junto aos modelos AR ou ARMA em dados do SMFS, foi constatado que somente para uma janela de tempo da ordem de 20 minutos é que os intervalos de confiança obtidos via *Dados de Ambiente* tendiam a ter limites bem próximos aos valores encontrados pelo método de Prony para um grande distúrbio aplicado ao mesmo sistema alguns segundos antes. O método *Bootstrap* empregado em conjunto aos modelos AR ou ARMA envolve um alto custo computacional, pois é necessária a realização de várias reamostragens seguidas da aplicação do modelo AR ou ARMA feitas sobre a amostra original para se obter bons intervalos de confiança dos modos.

⁸É importante mencionar que este grau de precisão foi estabelecido pelos resultados gerados pelo método de Prony aplicado a um grande distúrbio no sistema segundos antes de se iniciar a identificação via o modelo ARMA em sinais compostos apenas por *Dados de Ambiente*.

Estes resultados mostram que tanto para a simulação de Monte Carlo quanto para o método *Bootstrap* empregados juntamente com os modelos AR ou ARMA, são necessários vários minutos de dados compostos por *Dados de Ambiente* para se encontrar um intervalo de confiança pequeno. De posse destas informações, a aplicação destes métodos para controle e monitoramento da segurança de sistemas em tempo real passa a se tornar restritiva.

Uma outra forma de reduzir o tempo computacional do processo de identificação de modos eletromecânicos usando o modelo ARMA aplicado em *Dados de Ambiente* foi proposta em [40]. Nesta proposta são usadas propriedades estatísticas de segunda ordem que relacionam os intervalos de confiança dos modos eletromecânicos com a variância dos parâmetros dos modelos usados - aplicação da teoria da variância dos parâmetros [41]. Este procedimento de identificação, como mostrado pelos autores, é capaz de encontrar intervalos de confiança, em alguns casos, cinco vezes mais rapidamente que a simulação de Monte Carlo, reduzindo assim o número de blocos de dados a serem analisados o que pode tornar este método atrativo para aplicações em tempo real.

Métodos de Identificação de Sistemas Determinísticos e Estocásticos⁹

Na classe de algoritmos de identificação de sistemas que podem considerar entradas determinísticas e estocásticas (3.1), os modelos **ARX** *Auto-Regressive Model with Exogenous Inputs* e **ARMAX** *Auto-Regressive Moving-Average Model with Exogenous Inputs*, que são amplamente utilizados em identificação de sistemas ainda não foram empregados para a detecção de modos amostrados via SMFS.

Métodos determinísticos-estocásticos que já foram usados na estimação de modos eletromecânicos são apresentados a seguir.

Em [34] um algoritmo linear capaz de analisar sinais estocásticos e sinais com presença de grandes distúrbios (*Ringdowns*) é utilizado. Este algoritmo também é capaz de identificar sistemas quando entradas (sinais de teste) são utilizados.

Este método de identificação é baseado na teoria de Identificação de Subespaços de Espaço de Estados *Subspace State Space System Identification*, sendo que o algoritmo utilizado em [34] foi o conhecido

⁹Definição do tipo de sistema encontrada em [31].

por **N4SID**¹⁰, que baseia-se em técnicas da teoria de realização de sistemas [31, 42].

Este algoritmo é capaz de identificar sistemas na forma de espaço de estados, ou seja, identificar as matrizes **A**, **B**, **C** e **D** do sistema sob estudo, além da matriz de ganho **K_f** do filtro de Kalman.

No artigo [34] são usados diversos tipos de sinais de teste para a identificar os modos eletromecânicos do sistema, tais como pseudo sinais aleatórios de baixa amplitude (ruídos) e ondas quadradas com frequências específicas. Além dos sinais de teste, são analisados os sinais aleatórios medidos, originados pelos chaveamentos de carga do sistema. Para comparação de modos identificados via método de Prony, foi utilizada a inserção de um resistor de frenagem (1400 MW) por um curto intervalo de tempo. Portanto os testes mencionados foram aplicados em um sistema real.

Quando a identificação dos modos foi possível, os mesmos apresentaram valores coerentes com os obtidos via método de Prony, embora os sinais utilizados fossem de pequena magnitude.

Alguns modos inter-área não foram identificados para casos onde ondas quadradas com frequências próximas aos modos específicos que se desejava identificar foram aplicadas. Isto deve-se ao fato de que para detectar tais modos é necessário aplicar sinais com frequências próximas aos mesmos e que estes sinais possuam energia suficiente. Desta forma é necessário conhecer de antemão a frequência de oscilação do modo que se deseja identificar e ainda pode-se tornar necessário o aumento gradual da magnitude dos sinais.

Uma alternativa para solucionar este problema é a utilização de ruídos pseudo-aleatórios de baixa amplitude, que apresentam um largo espectro de frequência.

A vantagem de se utilizar sinais teste, além do aumento da qualidade dos resultados, é que a identificação pode ser feita com sinais de pequena magnitude, da ordem das variações aleatórias de cargas. Para isto é necessário aplicá-los por um longo intervalo de tempo para melhorar a qualidade da identificação. Por outro lado, a aplicação de sinais teste em sistemas de potência pode não ser recomendada.

A fim de encontrar o intervalo de confiança para a identificação de modos do sistema usando sinais de SMFS, em [43] o método *Bootstrap* é utilizado em conjunto com o algoritmo de identificação de subespaços **N4SID**, usando sinais teste do tipo pseudo aleatórios, além

¹⁰**N**umerical Algorithms **f**or Subspace State Space System **I**dentification.

das variações aleatórias das cargas (*Dados de Ambiente*).

As identificações foram feitas para dados gerados por um sistema real e para um sistema linearizado. Embora o artigo não mencione o custo computacional, o grande número de simulações do conjunto *Bootstrap-N4SID* inviabiliza sua aplicação em tempo quase real.

Em [44], três algoritmos são empregados para detecção de modos têm seus desempenhos comparados. Neste artigo os algoritmos empregados utilizam os métodos de *Yule-Walker modificado estendido*, **N4SID** e é introduzido um novo método, chamado de método de *Yule-Walker Modificado Estendido com Análise Espectral*. Na verdade os algoritmos que apresentam o método de Yule-Walker são empregados para se encontrar os pólos dos modelos AR e ARMA, sendo que o que utiliza análise espectral usa a transformada rápida de Fourier e sua inversa, juntamente com o método de Welch [45]

A justificativa para a utilização do método de Yule-Walker (YW) é que ele é um método de estimação paramétrica que apresenta vantagens sobre o método dos mínimos quadrados ¹¹.

Segundo [32], no livro de Kay ¹² é estabelecido que o método de *Yule-Walker Modificado Estendido* empregado tanto na solução de modelos AR quanto ARMA é o método que apresenta melhor desempenho para casos onde os pólos estão próximos ao círculo unitário. Como este é o caso típico onde sistemas de potência costumam apresentar modos pouco amortecidos, é o método utilizado nos artigos [32, 33, 44] para detecção de modos eletromecânicos.

As estimações são feitas para amostras de sinais de saída de simulações de sistemas de potência linearizados, pois assim é possível fazer a comparação com os autovalores dos respectivos sistemas. Também para os sistemas linearizados e simulados é empregada a simulação de Monte Carlo (considerando 1% das cargas variando aleatoriamente) a fim de comparar a precisão dos métodos sob análise.

As comparações em [44] foram feitas em um sistema linearizado para:

- Estimativa de modos;
- Análise do tamanho do bloco de dados a ser analisado;

¹¹ A escolha do método de YW já havia sido mencionada pelos mesmos autores em [32].

¹²Modern Spectral Estimation: Theory and Application, S.M. Kay - Prentice Hall, 1988.

- Desempenho a grandes perturbações;
- Perda de dados, falhas no sistema de medição e grandes ruídos no sistema de medição.

Os três algoritmos [44] apresentaram resultados satisfatórios, mas deve-se ressaltar que as diferenças de desempenho entre os três algoritmos estão relacionadas sempre ao tamanho da janela de tempo (ou de bloco de dados) analisadas e que as mesmas devem ter no mínimo 10 minutos para que os desempenhos sejam mais satisfatórios.

No mesmo artigo é mencionado que os três algoritmos foram implementados em centros de controle para monitoração da parte oeste dos Estados Unidos, no qual o Operador Independente do Sistema, juntamente com a Boneville Power Administration (**BPA**) e a Pacific Gas and Electric Co. (**PG&E**).

Devido ao tamanho das janelas ser relativamente grande, os autores mencionam que as estimativas dos modos é atualizada a cada 2 ou 3 segundos, passando a chamar o processo de estimação de *estimação próxima ao tempo real* ¹³.

Métodos Recursivos

Os métodos recursivos, assim como os métodos que usam blocos para estimar modos necessitam de muitos minutos de dados para que os modos possam ser estimados com precisão aceitável [44].

Em [28] são comparados três tipos de algoritmos, o mínimos quadrados recursivo *Recursive Least Square* (RLS), o mínimo médio quadrado *Least Mean Square* (LMS) e é introduzido o algoritmo mínimos quadrados recursivo robusto *Robust Recursive Least Square* (RRLS).

O desempenho destes algoritmos é analisado tanto para um sistema linearizado, onde foi usada a simulação de Monte Carlo para se encontrar um intervalo de confiança, e também para dados reais de SMFS, onde não são utilizadas simulações de Monte Carlo, nem o método *Bootstrap*. As janelas de dados continham:

- Dados de Ambiente - Variações e chaveamentos aleatórios de cargas;
- Mudanças repentinas de modos interárea;

¹³Near real-time.

- Grandes perturbações;
- Perda de dados, falhas no sistema de medição e grandes ruídos no sistema de medição.

Após simulações foi constatado que o algoritmo LMS não é capaz de convergir após uma grande perturbação e portanto somente o RRLS, RLS e Prony foram comparados.

Através de simulações foi constatado que o RRLS apresenta resultados mais precisos (satisfatórios) que o RLS e que pode ser empregado em janelas de dados que contenham pequenas e grandes variações nos sinais analisados. Foi mencionado também que *ao se iniciar*¹⁴ o algoritmo, é necessária uma janela de 200 a 300 *s* para que as estimativas tornem-se satisfatórias.

Para o desempenho se tornar melhor ainda, foi proposto um ajuste adaptativo do fator de esquecimento a ser utilizado no decorrer da simulação.

Trabalhos levando em consideração a aplicação do RRLS no modelo ARX estão sendo realizados a fim de se incluir sinais de entrada exógenas.

Análise Espectral

Um outro método que é largamente usado em análise de sinais e que também está sendo utilizado para detecção de modos de sistemas de potência são métodos de análise espectral.

A análise espectral relaciona a distribuição energia-frequência de sinais usando a transformada de Fourier.

A transformada de Fourier decompõe o sinal a ser transformado em uma soma ponderada de exponenciais complexas. Apesar de fornecer informações sobre as componentes freqüenciais dos sinais transformados, uma das desvantagens da transformada de Fourier é que ela não informa o tempo em que essas componentes ocorrem e portanto não tem resolução temporal, apenas freqüencial.

Embora a transformada de Fourier seja válida para diversas condições, existem algumas restrições, pois o sistema deve ser linear e os dados devem ser periódicos ou estacionários, caso contrário a representação espectral do sinal apresentará componentes de freqüência espúrias usadas para representar a não periodicidade do sinal.

¹⁴Nomeado de Cold Start.

Este fenômeno ocorre pois o espectro de Fourier define componentes harmônicas uniformes de forma global e portanto necessita de muitas componentes harmônicas adicionais para simular a não estacionariedade do sinal que são não uniformes globalmente. Como resultado a energia do sinal é espalhada por uma vasta faixa de frequência [46].

Dentre as vantagens de se aplicar análise de métodos de Fourier pode-se citar que eles são robustos a ruídos e podem ser implementados eficientemente devido a existência da transformada rápida de Fourier - *Fast Fourier Transform* (FFT).

A detecção de modos eletromecânicos via aplicação da transformada de Fourier para análise de sinais de saída de programas de estabilidade transitória foi apresentada pela primeira vez em [47] e mais tarde estendida em [48]. Os dois métodos baseiam-se em deslizamento de janelas, onde a transformada de Fourier é aplicada a cada uma delas possibilitando a estimativa dos modos.

Em [49] dados do SMFS são utilizados para detecção de modos usando um método proposto que se baseia no uso da transformada de Fourier. Neste artigo a análise espectral do sinal da diferença de frequência das barras da interligação do sistema em questão serve para estimar alguns parâmetros definidos, que em seguida são usados em um método de interpolação apresentado em [50] que minimiza um erro quadrático, estimando os modos interárea do sistema japonês.

No mesmo artigo, [49], são analisados sinais originados por pequenos e grandes distúrbios. Para as pequenas variações aleatórias de carga, as janelas de tempo usadas são de grande duração e a estimação dos modos é feita a cada 5 minutos. Para os grandes distúrbios, as janelas utilizadas na análise são da ordem de 20 segundos. Além disto, para estes casos, a escolha do início e término das respectivas janelas é feita de forma que a análise seja feita somente onde as não-linearidades não estão presentes. As informações amostradas pelas PMUs e utilizadas na estimação são dados do sistema de distribuição (100 V).

Em [51], um método híbrido que combina quatro algoritmos diferentes, incluindo a transformada de Fourier discreta - Discret Fourier Transform (DFT), filtro FIR ¹⁵, o método dos mínimos quadrados e um algoritmo proposto pelos autores é usado para detecção de modos eletromecânicos de sistemas de potência.

A utilização conjunta destes algoritmos é capaz de determinar a amplitude, frequência e amortecimento de sistemas de potência, para

¹⁵Finite Impulse Response

oscilações de pequena e de grande magnitude. Este algoritmo vem sendo implementado e está sob testes no sistema de medição fasorial de Taiwan [51].

Transformada Wavelet

Um outro método que utiliza análise espectral e apresenta vantagens sobre a transformada de Fourier é a Transformada Wavelet (TW), que baseia-se na idéia de se poder analisar sinais com diferentes escalas de tempo e frequência sem perda de resolução.

A idéia de análise de multi-resolução deu origem à aplicação das wavelets por volta da metade da década de 1980 em técnicas discretas de processamento digital de sinais [52].

Esta ferramenta é capaz de lidar com sinais não estacionários ou aperiódicos, sendo que em sistemas de potência ela vem sendo aplicada com sucesso nas áreas de qualidade de energia, localização de faltas, análise de chaveamentos em linhas de transmissão e em transitórios eletromagnéticos.

As aplicações da TW para detecção de modos em sistemas de potência via sinais de SMFS ainda é pequena e portanto existem poucas publicações sobre o assunto ¹⁶.

Em relação à transformada de Fourier convencional, a TW é capaz de relacionar o tempo à frequência e também à magnitude na análise de sinais, fornecendo informações sobre o tempo de ocorrência e o conteúdo de frequência dos eventos. Esta característica possibilita a visualização de variações de frequência de forma local e bem definida, pois o sinal original pode também ser decomposto em vários sinais com frequências específicas, ao contrário da transformada de Fourier onde a frequência é definida globalmente.

A TW também apresenta vantagens sobre outros métodos baseados na transformada de Fourier que também podem relacionar o tempo à frequência, como a *Short Time Fourier Transform* (STFT). A STFT é um método que assume periodicidade local através da utilização de uma janela de tamanho fixo que desliza continuamente sobre os dados.

A vantagem da TW sobre a STFT é que na TW o tamanho das janelas varia de acordo com a escala de frequência. Assim sendo, quando o sinal apresenta componentes com alta frequência a janela é pequena e a recíproca também é válida (o tamanho da janela é inversa-

¹⁶Algumas referências são apresentadas na Seção 4.8.

mente proporcional à frequência em análise). Em [53] é mostrado que a TW discreta apresenta escala logarítmica na frequência sendo que a STFT apresenta escala fixa.

Como mencionado anteriormente, a TW também é capaz de decompor sinais complexos em diversos sinais compostos por frequências específicas, possibilitando que a análise de cada um deles seja feita de acordo com a resolução mais adequada à sua escala de frequência. Esta propriedade é conhecida como análise multi-resolução tanto no tempo quanto na frequência [54].

A possibilidade de decomposição do sinal original em vários com espectros de frequência bem definidos também faz com que a TW funcione como um filtro passa faixa [52].

Desde o surgimento das TWs, vários tipos foram e vêm sendo criados, sendo que a aplicação de cada uma delas depende do tipo de aplicação. Para isto é necessário encontrar os tipos de transformadas mais adequados, sendo que a escolha da *mother wavelet* mais adequada é capaz de aumentar a eficiência computacional do processo [55].

Em [56] é mencionado que a qualidade da wavelet depende do sinal analisado e em [51] isto também é reforçado que sinais senoidais amortecidos não são wavelets. Assim torna-se necessário a escolha dos tipos de TW mais adequados para a detecção de modos, podendo isto ser um tipo de limitação.

Dentre as publicações encontradas com emprego da TW pode-se mencionar [57], onde um método de detecção de eventos e estimação de modos é utilizado. Os dados utilizados na análise via transformada wavelet ¹⁷ são dados de vários *Monitores Portáteis de Sistemas de Potência* ¹⁸, que são aparelhos variantes das PMUs, que amostraram dados do *blackout* ocorrido em agosto de 2003 nos Estados Unidos e Canadá.

Também na análise de eventos em [58] a configuração do sistema elétrico Italiano foi reconstruída para o caso onde ocorreu o *blackout* de setembro de 2003. Através de análises de sinais de um programa de estabilidade transitória foi utilizada a análise espectral via wavelets, onde através de um espectro que relaciona tempo, frequência e magnitude (*dB*) é possível identificar as frequências de oscilação dos modos inter-área.

Neste caso também pode-se ter uma idéia de quais modos são menos amortecidos fazendo uma inspeção visual no espectro tempo-

¹⁷Haar e Daubechies Wavelets.

¹⁸Portable Power System Monitors.

magnitude-frequência gerado pela TW ¹⁹. Isto pode ser identificado através do período de tempo que eles aparecem no espectro.

Um método para se encontrar tanto a frequência quanto o amortecimento usando a TW tipo *Morlet* a cada instante pode ser encontrado em [59].

Vale ressaltar que a aplicação da TW para detecção de modos eletromecânicos geralmente é feita apenas sob condições de grandes distúrbios (*Ringdown*). Sua aplicação em sistemas onde os sinais são compostos por pequenos ruídos aleatórios como as variações e chaveamentos de carga, os *Dados de Ambiente* foi feita pela primeira vez em [60].

Transformada de Hilbert

Um outro método desenvolvido no final da década de 1990 e apresentado em [46] teve como intuito ampliar os resultados obtidos pelas TWs. Este método é capaz de analisar dados de sistemas não lineares e não estacionários em séries temporais e além disto é um método adaptativo.

A TW é não adaptativa. Assim, uma vez que o tipo de função de análise ou *mother wavelet* for escolhida ela deve ser utilizada em toda a análise. Já o método proposto pelos autores é adaptativo, pois baseia-se diretamente nos dados sob análise.

Adaptatividade é um requisito crucial para processos não lineares e não estacionários, pois somente a adaptação às variações *locais* faz com que a decomposição dos sinais seja feita levando-se em consideração as características físicas do processo e não somente requisitos matemáticos de ajuste aos dados.

O método desenvolvido e apresentado pela primeira vez em [46] baseia-se na transformada de Hilbert (TH) e tem como parte chave a chamada *decomposição modal empírica* (EMD), que decompõe o sinal em um conjunto finito de ondas compostas por diferentes componentes modais dominantes chamados de *funções modais intrínsecas* (IMF) que admitem transformadas de Hilbert bem comportadas.

As IMFs podem ser lineares ou não e ainda variantes no tempo e graficamente lembram as funções geradas pela decomposição escalonada por diferentes frequências das TWs.

Devido ao fato das IMFs não serem necessariamente ortogonais, sendo muitas vezes *quase ortogonais*, a violação desta restrição para a

¹⁹Morlet Wavelet.

construção das IMFs faz com que o método possa ser empregado em dados que apresentem não linearidades, pois decomposições ortogonais são características de sistemas lineares. Como este método é adaptativo e baseia-se em características locais, as inovações conceituais do mesmo são: a atribuição de significado físico à *freqüência instantânea* para cada modo, que geralmente é extraído de um sinal que pode apresentar alta complexidade, e a introdução das IMFs praticamente ortogonais.

A utilização do conceito de freqüência instantânea é capaz de eliminar não somente a necessidade de existência de componentes harmônicas com freqüências superiores quando o sinal é não linear, fato que as wavelets não são capazes de fazer, mas também componentes harmônicas espúrias geradas por sinais não estacionários. Devido à capacidade de eliminar componentes espúrias de freqüência de dados não estacionários e não lineares, a TH apresenta resolução do espectro de freqüência bem melhor que as TWs, que baseiam-se na análise de Fourier.

Este método está sendo chamado por alguns autores de Transformada de Hilbert-Huang (*THH*) e é considerado o primeiro método local e adaptativo em análise espectral que relaciona tempo à freqüência.

Com estas propriedades pode-se localizar qualquer evento precisamente ao longo do tempo e estimar quais modos estão participando com maior intensidade nas oscilações, sendo que tanto sua freqüência quanto seu amortecimento, que pode ser obtido após alguns cálculos adicionais, são obtidos instante a instante.

Este método pode ser aplicado com sucesso onde existem mudanças abruptas de freqüência. Já a TW apresenta bons resultados somente quando existem variações graduais de freqüência [46].

A utilização da THH já vem sendo aplicada em sistemas de potência para a detecção de modos eletromecânicos via sinais amostrados pelo SMFS e análise de sinais de saída de programas de estabilidade transitória [61, 62, 63].

Com este tipo de análise torna-se possível saber em que instantes controladores, controles temporizados e distúrbios ocorrem no sistema, pois o método é local. Além disto é também possível detectar além da não estacionariedade do sinal o surgimentos de novos modos *atípicos* ao sistema que são detectados pelo método ao longo da análise do sinal e que podem gerar um comportamento não estacionário.

Segundo os autores estes modos podem ser gerados por interações modais não lineares, podendo ser mais prejudiciais ao sistema do que os próprios modos interárea. Relatos de detecções de interações não

lineares via THH podem ser encontrados em [61].

O método proposto serve também como filtro devido à decomposição do sinal original em um conjunto de sinais compostos por diferentes modos (IMFs) e é portanto capaz de eliminar as componentes contínuas e as tendências²⁰.

Assim como para a TW, neste método não foram analisados dados onde existe somente *Dados de Ambiente* e também não há relatos de aplicação onde existem perdas de dados.

A aplicação da THH em sinais onde existem perda de dados é uma proposta futura em [63].

3.3.4 Controle para Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas

Nesta seção são mencionados de forma breve artigos que foram publicados nos últimos anos que utilizam sinais de SMFS em controladores para amortecimento de oscilações em SEP.

Até há algum tempo atrás, os controladores de SEP eram projetados para terem sinais de realimentação locais tais como tensão das barras, velocidade angular das máquinas, potência elétrica, dentre outros. Estes tipos de controladores têm reconhecidamente a propriedade de amortecer modos locais com eficiência, mas podem apresentar algumas vezes certa limitação quando deseja-se amortecer oscilações iterárea devido à falta de observabilidade destes modos em sinais locais.

A utilização de sinais remotos e locais usados na realimentação de controladores atualmente já é possível de ser feita devido à utilização de SMFS que é capaz de transmitir dados de regiões geograficamente distantes em curtos intervalos de tempo.

A escolha de sinais a serem medidos e utilizados em controladores é um problema encontrado regularmente quando se deseja obter um bom desempenho dinâmico do sistema. Sinais com bons índices de observabilidade e de controlabilidade [3] em relação aos modos que se deseja amortecer devem ser escolhidos para uma maior eficiência da malha de controle.

Uma das maiores dificuldades da utilização de sinais remotos em controladores é a necessidade de que as tecnologias empregadas na transmissão de dados sejam capazes de enviar tais sinais com um mí-

²⁰Trends/Drifts.

nimo de atraso possível, da ordem de tempo tais como os apresentados na Seção 3.2, e que os métodos empregados no projetos de tais controladores sejam capazes de levar em consideração os atrasos.

Outra questão relevante no emprego de sinais remotos em controladores é a possibilidade de haver a perda de alguns sinais, o que compromete o desempenho dinâmico do sistema.

Dentre os tipos de controladores empregados, os Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) são atualmente os controladores mais comumente utilizados no amortecimento de oscilações devido à sua simplicidade e relação custo/benefício para o sistema.

Atualmente os dispositivos FACTS e os sistemas de transmissão de corrente contínua em alta tensão - High Voltage Direct Current (HVDC) chamam atenção pelo seu emprego no sistema de transmissão. Os dispositivos FACTS além de serem capazes de controlar fluxo de potência e níveis de tensão, podem amortecer oscilações inter-área quando controles suplementares são utilizados. Da mesma forma os sistemas HVDC, por possuírem grande controlabilidade e rápida resposta, podem ser usados no amortecimento de oscilações eletromecânicas do sistema quando os mesmos interligam sistemas juntamente a sistemas de transmissão convencional em corrente alternada de forma paralela. Quando não existe este paralelismo, o sistema interligado é desacoplado no sentido de operação de forma assíncrona das extremidades. O amortecimento das oscilações ocorre quando controles suplementares são aplicados ao elo HVDC, reduzindo desbalanços de potência que ocorrem em ambas extremidades do sistema em corrente alternada.

Todos estes tipos de equipamentos e dispositivos mencionados vêm sendo estudados há algum tempo já com a possibilidade de utilização de sinais remotos oriundos do SMFS de forma a melhorar o comportamento dinâmico de SEP quando se empregam técnicas de controle. A seguir trabalhos sobre a aplicação destes equipamentos e de diversas técnicas de controle são brevemente mencionados.

Uma das primeiras publicações onde sinais remotos de SMFS são empregados em controle para amortecimento de oscilações datam do final da década de 1990 [64, 65], onde foram usadas inicialmente técnicas de controle clássico e o emprego de Desigualdades/Inequações Matriciais Lineares - Linear Matrix Inequalities (LMIs) [66], respectivamente, no projeto dos controladores tipo ESP, utilizando-se de sinais locais e remotos.

Em [65] os autores utilizam técnicas de controle \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ que

podem ser encontradas em [67] para serem resolvidas via LMIs, considerando também incertezas no modelo para tornar o controle mais robusto. Este artigo talvez tenha sido o que abriu as portas para a utilização de técnicas de controle ótimo tipo \mathcal{H}_∞ a ser resolvido via formulação LMI usando sinais remotos de SMFS. Após este tipo de abordagem, diversos artigos utilizaram este tipo de formulação de controle e alguns deles são mencionados nesta seção.

A consideração de perdas de sinais remotos também foi analisada pelo mesmo grupo de pesquisadores que escreveram os artigos [64, 65], sendo publicada em [68], onde mais uma vez são usadas técnicas de controle clássico e LMIs, sendo que a eventual perda de sinal é detectada por uma lógica e tal sinal é substituído por um sinal de característica parecida de máquinas próximas à que sofreu tal perda de sinal de controle. Somente em artigos mais recentes são levadas em consideração no projeto de controladores os efeitos de atrasos, incertezas em modelos, dentre outras que são mencionadas posteriormente.

A modelagem de incertezas em SEP esta relacionada principalmente às complexidades e não linearidades do sistema que para deixá-los mais *tratáveis* muitas vezes exige que simplificações sejam feitas. As incertezas podem ser então decorrentes de desconhecimento de parâmetros, linearizações em torno de pontos de operação e até mesmo eliminação de dinâmicas rápidas, ocasionando imprecisões no modelo e prejudicando a estabilidade e o desempenho do sistema como um todo.

Quando se deseja lidar com atrasos nos sinais remotos para emprego em controladores, as técnicas utilizadas por autores é variada e sabe-se que os efeitos de atraso de sinais de realimentação em controladores causam um *atraso de fase* em relação à frequência do modo de oscilação que se deseja amortecer, prejudicando o amortecimento do sistema [69].

Para levar em consideração os efeitos de atraso em de sinais de realimentação no projeto de controladores, as técnicas mais usadas em artigos onde são usados sinais remotos de SMFS são:

- **Sistemas Baseados em Controle Smith Predictor (SP)** e novas adaptações do método [70, 71]: SP foi a primeira ferramenta bem sucedida desenvolvida na década de 1950 para lidar com atrasos em sistemas de controle, onde um laço de realimentação consistindo em um estimador converte o problema de controle de um sistema que contém um atraso de tempo em um problema de controle livre de atrasos. Esta abordagem é capaz de simplificar

consideravelmente o projeto e a análise do sistema e após sua utilização, técnicas de controle são aplicadas;

- **Aproximações de Padé:** este método é muito utilizado para aproximar a função irracional de atraso puro e^{-st} através de relações de polinômios e formar uma função de transferência. Após esta aproximação é possível transformar as funções de transferência em matrizes de estado e conectá-la à matriz de estados do SEP linearizado, formando assim um sistema aumentado onde pode-se em seguida aplicar técnicas de controle;
- **Incertezas Estruturadas via Linear Fractional Transformation - (LFT)** [67, 72]: a modelagem de tais incertezas é feita separando na realimentação de controle as partes constantes e conhecidas (matriz constante) das desconhecidas (matriz com parâmetros dinâmicos) limitando os valores desconhecidos em faixas de valores em que sua ocorrência é possível e subsequente uso de técnicas de controle;

Já no quesito de emprego de técnicas de controle, após a consideração ou não de incertezas e atrasos, artigos publicados que lidam com sinais oriundos de SMFS empregam técnicas de controle clássico (compensação), controle linear quadrático (LQR), adaptações do controle Smith Predictor (SP), controle \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ , Gain Scheduling - (GS). Também são empregadas técnicas de LMIs que podem ser usadas para resolver os controladores mencionados anteriormente ainda com a possibilidade de utilizar alocação de pólos em regiões desejadas do plano complexo (\mathcal{D} -estabilidade) [73, 74].

O principal conceito do controle tipo Gain Scheduling (GS) é o projeto de diversos controladores invariantes no tempo para diferentes pontos de operação que são capazes de assegurar a estabilidade em malha fechada para um dado método de projeto de controlador. Geralmente para tal finalidade usam-se técnicas controle robusto para garantir o desempenho do sistema, pois geralmente existem regiões de transição no sistema em que o desempenho pode não ser satisfatório, ou seja, entre conjuntos de pontos onde os controladores foram projetados. Logo um controlador robusto assegura um certo desempenho na vizinhança de pontos de projeto [75].

Os controles \mathcal{H}_2 e \mathcal{H}_∞ são baseados em normas de sistemas e lidam basicamente com a capacidade de um sistema de controle ser

capaz de limitar efeitos indesejáveis de perturbações em variáveis de saída de interesse. O controle \mathcal{H}_2 é normalmente associado ao controle LQG, otimizando a norma \mathcal{H}_2 do sistema. Já o controle \mathcal{H}_∞ tem como objetivo minimizar o maior ganho da resposta em frequência do sistema, minimizando o efeito da pior perturbação na saída do mesmo [72, 67].

O ajuste de parâmetros de controladores em artigos como [76] e [77] é feito usando, respectivamente, algoritmos genéticos e programação/otimização dinâmica a fim de melhorar o desempenho do sistema que usam sinais de SMFS em sua realimentação.

Para simplificar a relação entre os artigos, as citações a seguir estão associadas levando-se em consideração os tipos de técnicas de controle empregados, independentemente se e de quais formas os atrasos e as incertezas foram considerados no momento do projeto dos controladores.

A grande maioria dos controladores usados para amortecer oscilações que usam sinais amostrados do SMFS empregam técnicas de \mathcal{H}_∞ que são resolvidas ou não via formulação LMI. Algumas das referências são [78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 71].

Da mesma forma, em [85, 86] e [87] foram usados controles do tipo LQR e LQG robusto, respectivamente no amortecimento de oscilações eletromecânicas.

Quando se refere ao uso de HVDC para amortecimento de oscilações, a existência de artigos usando SMFS ainda é pequena sendo limitada a sistemas de máquina barra infinita usando LMIs [88] e técnicas de controle clássico para um sistema multimáquinas [89]. Já a utilização de equipamentos FACTS apresenta maior bibliografia, sendo que algumas das referências utilizaram técnicas de controle \mathcal{H}_∞ e portanto estão citadas na lista de referências onde se emprega o citado tipo de controlador, logo acima.

Existem ainda alguns artigos que utilizam técnicas não lineares de controle juntamente com sinais de SMFS, dentre eles pode-se citar [90, 83].

Para melhorar o desempenho de sistemas, é necessário que uma boa escolha de sinais seja feita, ou seja, é necessário que os modos desejados sejam observáveis nos sinais. Para isto, em [91] dois métodos para escolha de melhores sinais oriundos de SMFS para serem usados em controladores são estudados: o método dos resíduos e o método geométrico.

Neste trabalho a aplicação de técnicas de controle do tipo LQR,

uso de LMIs e técnicas de otimização não-convexa e não-suave são utilizados e detalhes são apresentados na Seção 7.2.

3.4 COMENTÁRIOS

Para se poder identificar modos, antes de tudo, é necessário saber qual será a estratégia escolhida, isto é, se o algoritmo de identificação deve ser iniciado somente quando algum tipo de perturbação significativa no sistema é detectada por lógicas pré-estabelecidas no programa ou se o algoritmo deve ser utilizado constantemente, detectando os modos continuamente.

Caso a opção escolhida seja a de detectar os modos somente quando ocorram grandes perturbações, antes de tudo, é necessário saber qual a magnitude das oscilações, o quanto elas persistem, as faixas de frequência que devem ser detectadas e como o algoritmo de identificação deve ser inicializado.

As condições operativas do sistema, tais como carregamento e topologia, além de dados estatísticos, devem servir como ponto de partida nestes casos para se poder ajustar os limites de detecção e lógicas mais adequados a serem utilizados nos algoritmos escolhidos.

Optar pela monitoração contínua de modos implica na análise de grandes janelas de tempo para se obter estimativas confiáveis, mesmo quando ocorrem falhas de medição, perda de dados e o comportamento do sistema seja não estacionário, como mencionado em diversas referências citadas na Seção 3.3.3.

A análise de grandes janelas pode levar a atrasos da atualização de dados e dependendo da aplicação comprometer o desempenho dinâmico do sistema caso se deseje usar estas informações para ajustes de controladores, o que é um dos objetivos desta pesquisa.

O processo de detecção é de grande importância para que medidas de segurança e de controle possam ser aplicadas adequadamente. Portanto precisão e velocidade das estimativas são fundamentais, já que sempre pode-se escolher o algoritmo mais adequado para cada situação onde se deseja analisar determinados fenômenos.

Para que a detecção automática seja feita da melhor forma possível, em [92] é sugerido que um pacote composto por um conjunto de algoritmos seja desenvolvido, onde cada um deles deva ser acionado para cada condição específica detectada.

Embora existam poucos estudos, algoritmos que apresentam grande potencial para analisar janelas de curta duração, levando vantagem sobre o método de Prony no quesito não estacionariedade de sinais, são as Transformadas Wavelets e a Transformada Hilbert-Huang, sendo que o último método ainda leva vantagem sobre o primeiro pois é capaz de analisar sinais não lineares [46].

3.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada a tecnologia de SMFS, que abre as portas para diversas aplicações em diferentes áreas do SEP, sendo dado ênfase para sua aplicação na melhoria do desempenho dinâmico de sistemas.

Uma das aplicações que vem sendo pesquisada é o uso de algoritmos de identificação de sistemas, que aplicados em sinais fornecidos pelo SMFS possibilita o acompanhamento de modos pouco amortecidos do sistema, permitindo que ações preventivas/corretivas de controle possam ser tomadas. Devido a ser uma aplicação considerada recente, várias propostas vêm sendo apresentadas ao longo dos últimos anos, mas ainda não se sabe ao certo quais delas terá a possibilidade de analisar com maior rapidez e precisão os dados amostrados.

O mesmo ocorre com as técnicas de controle, com a existência da possibilidade de perdas de sinais e surgimento de atrasos nos sinais locais e remotos usados na realimentação de controladores é necessário que as técnicas empregadas sejam capazes de lidar com tais problemas da melhor forma possível.

O uso de SMFS faz com que a nova tendência de aplicações de técnicas de controle seja feita não mais de forma sequencial e com uso de realimentação de sinais locais apenas, o SMFS possibilita o uso de técnicas de controle multivariável com o uso de sinais locais e remotos, além do emprego de técnicas robustas.

Detalhes sobre estudos realizados em detecção de modos via análise de sinais oriundos de programas de estabilidade transitória e de PMUs instaladas na rede básica do Sistema Interligado Nacional são apresentados nos próximos capítulos, assim como a aplicação de sinais de SMFS em controladores.

PGEELT_EX.



5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO

Neste capítulo, considerações sobre a aplicação dos métodos e algoritmos de identificação descritos no Capítulo 4 são apresentadas.

Propostas para ordenar autovalores através de suas respectivas energias modais para o método de Prony e para algoritmos de subespaço de estados são feitas. Um algoritmo que permite que rastreamentos modais possam ser feitos de maneira automática utilizando algoritmos de subespaço em conjunto com um índice de dominância modal é *proposto*.

Tipos de modelagens matemáticas para a representação de sistemas elétricos de potência são apresentados. Dentre as modelagens são *propostas* o uso de sistemas lineares com parâmetros variantes para emular não-estacionariedades em sistemas e também uma modelagem de carga dinâmica que varia aleatoriamente no programa ANATEM [173]. Esta modelagem de carga serve para representar os dados de ambiente em um sistema não-linear. Já os diferentes tipos de representações matemáticas de sistemas servem para testar e validar os métodos e algoritmos apresentados no Capítulo 4.

5.1 CONSIDERAÇÕES NAS IMPLEMENTAÇÕES DOS ALGORITMOS DE DETECÇÃO DE MODOS ELETROMECAÑICOS

A aplicação de métodos de identificação tais como o método de Prony, Prony multi-sinais e a de métodos baseados na teoria de subespaço de espaço de estados, ao serem aplicadas em sinais reais sem prévio tratamento, geralmente fornecem resultados que podem não ser condizentes com a realidade.

Uma prática que deve ser utilizada para que o conjunto de métodos acima referido tenha um melhor desempenho é a do pré-tratamento dos dados, que consiste em eliminar ruídos e tendências indesejados dos sinais sob análise. Nesta seção as metodologias empregadas na literatura para pré-tratamento de sinais de sistemas elétricos de potência para detecção de modos eletromecânicos são apresentadas. Também nesta seção, a fim de ordenar o conjunto de autovalores fornecidos pelos referidos métodos, um Índice de Dominância Modal (IDM) [174] é *proposto* para ordenar os autovalores de acordo com sua energia. O emprego do IDM nos conjuntos de autovalores fornecidos pelo método de Prony e de subespaço permite discriminar os autovalores com maior

energia que estão localizados em faixas de frequência de interesse ¹, que são as dos modos inter-área. O uso conjunto de algoritmos de subespaço com o IDM é a base do processo de rastreamento de modos eletromecânicos de forma automática e contínua, *proposto* ao longo deste trabalho.

A EMD e a EEMD, por apresentarem comportamentos de filtros adaptativos, normalmente não necessitam de pré-tratamento de sinais para efetuarem a decomposição modal, porém a Transformada de Fourier tem um papel importante para verificar se as respostas fornecidas após o uso da EMD e da EEMD foram bem sucedidas. O papel da Transformada de Fourier é o de verificar se as IMFs obtidas no processo de *peneiramento* possuem apenas um modo dominante. Este fato é crucial para a obtenção de frequência, amplitude e amortecimento instantâneos de cada modo de oscilação que compõe o sinal sob análise, como mencionado na Seção 4.5.

5.2 PRÉ-TRATAMENTO DOS DADOS

Para melhorar o processo de detecção de modos deve-se inicialmente realizar o pré-tratamento dos dados. Para isto é importante conhecer a natureza das oscilações dos sinais sob análise e também as faixas de frequência que compõem os mesmos. Neste trabalho a faixa de frequência das oscilações de interesse varia de $0,1 \text{ Hz}$ a 3 Hz , que é a faixa de frequência das oscilações eletromecânicas de sistemas elétricos de potência. Frequências fora desta faixa presentes nos sinais devem ser eliminadas ².

A atenuação destas componentes de frequência indesejadas é normalmente obtida através da utilização de filtros. Filtros utilizados para tal finalidade em [32] e em [40] têm frequência de corte igual a $2,0 \text{ Hz}$. Já os utilizados em [34] têm frequência de corte $f_c = 2,5 \text{ Hz}$. Neste trabalho é usado um filtro passa-faixa. Os modos de oscilação eletromecânicos dos sistemas teste cujos sinais serão analisados, assim como

¹Normalmente, quando se analisam dados reais, surgem modos com frequência de oscilação praticamente iguais, porém com amortecimentos bastante diferentes. Isto se agrava quando a frequência de amostragem é baixa (menor que 20 Hz) e o uso do IDM é uma boa solução para estes eventuais problemas.

²Casos específicos de oscilações fora desta faixa podem eventualmente ocorrer, porém a maioria destes casos não faz parte deste estudo. Um destes exemplos é o fenômeno de ressonância subsíncrona.

sinais do Sistema Interligado Nacional (SIN), estão dentro da faixa de frequência mencionada (0,1 Hz a 3 Hz). Através de diversos estudos sobre o comportamento de oscilações do SIN, foram encontradas as faixas de oscilação em que os principais modos inter-área do SIN se enquadram. Tais resultados estão apresentados na Tabela 5.1, divulgada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e disponível em: <http://www.ons.org.br>.

Tabela 5.1: Principais Modos Interárea do Sistema Interligado Nacional.

Modos	Faixa de Frequência
Norte x Sul	0,20 a 0,40 Hz
Sul x Sudeste	0,60 a 0,80 Hz
Norte x Nordeste	0,55 a 0,65 Hz
Mato Grosso x SIN	0,40 a 0,45 Hz
Rio de Janeiro x SIN	1,10 a 1,30 Hz
São Paulo x SIN	0,65 a 0,75 Hz

Para a filtragem dos sinais foram utilizados dois filtros digitais elípticos, um passa alta e outro passa baixa, com características apresentadas na Tabela 5.2, que ao final formam um filtro passa-faixa. Tais filtros foram ajustados levando-se em consideração a redução do efeito de atraso de fase para as faixas de frequências entre 0,1 e 3 Hz.

Tabela 5.2: Especificações dos filtros elípticos utilizados.

Valores	Passa Baixa	Passa Alta
F_{corte} (Hz)	3	0,01
Ordem	2	2
$Ripple_{F_{pass}}$ (dB)	0,2	0,001
Atenuação $_{F_{stop}}$ (dB)	60	60

Os filtros especificados na Tabela 5.2 são utilizados no pré-tratamento dos dados na maioria dos casos neste trabalho.

Além da utilização de filtros passa-faixa, eventuais tendências³ presentes nos sinais podem ser removidas via uso do comando *detrend* do Matlab, que é capaz de identificar diversos segmentos de reta, que representam as tendências, contidos nos dados via método dos mínimos quadrados. Outra parte bastante importante no processo de pré-tratamento de dados é a de normalização⁴. A normalização deve ser feita para evitar que sinais dominem e polarizem a resposta. Um exemplo é a análise simultânea de sinais de fluxo de potência, que apresentam

³Tendências nos sinais são geralmente componentes DC como retas e rampas.

⁴Divisão do sinal pelo seu respectivo valor médio.

magnitudes da ordem de centenas de MW, com sinais de frequência, que têm magnitudes que variam em torno de 60 Hz. Para estas grandezas físicas serem analisadas ao mesmo tempo, ambas devem estar em valores por unidade caso contrário as magnitudes dos sinais de frequência teriam a ordem de grandeza dos ruídos nos sinais de fluxo de potência ativa.

5.3 PROPOSTA PARA ORDENAÇÃO DE AUTOVALORES ATRAVÉS DA ENERGIA MODAL

Uma tarefa importante em métodos de identificação de sistemas está relacionada à identificação e ordenação dos modos calculados. Embora os sistemas que estão sendo identificados possuam ordens muito elevadas, como sistemas elétricos de potência, os sinais gerados por eles podem ser reconstruídos com apenas alguns modos, implicando que a dinâmica dos mesmos é dominada por um número pequeno de modos. O número de modos dominantes está diretamente associado à energia modal de cada um deles e também à observabilidade dos mesmos, ou seja, o ponto de onde se extraem as medidas.

Apesar destes fatos serem conhecidos, a escolha de uma ordem pequena para o sistema a ser identificado geralmente não é capaz de representá-lo fielmente, podendo transformar dois modos distintos que tenham significado físico em apenas um modo matemático, sem significado físico, capaz de reproduzir a dinâmica dos mesmos. Desta forma é usual a escolha de uma ordem algumas vezes maior que a do número de modos dominantes, o que pode melhorar o condicionamento numérico do método de identificação, mas que também gera modos matemáticos que servem para modelar eventuais comportamentos do sistema que não são de interesse ⁵.

A tarefa agora é determinar quais modos são eletromecânicos dominantes e quais são *artefatos numéricos*, ou modos matemáticos, utilizados para representar modos de mais baixa energia no conjunto de modos identificados pelos métodos. O problema de seleção de modos dominantes é muito importante para a monitoração contínua da estabilidade de sistemas e a seleção destes modos deve ser feita automaticamente. Um método capaz de efetuar tal tarefa foi proposto

⁵Exemplos seriam modos que servem para modelar eventuais tendências e até mesmo ruídos.

em [174] e é apresentado nesta seção. A utilização deste método em conjunto com os métodos de Prony, Prony multi-sinais e de subespaço foi proposto ao longo deste trabalho de doutorado e publicada em [175, 176, 23, 177, 178, 179].

5.3.1 O Índice de Dominância Modal

O Índice de Dominância Modal (IDM) foi originalmente proposto em [174], sendo um índice capaz de verificar se um modelo ou sistema identificado possui modos dominantes e, em caso afirmativo, ser capaz de determiná-los. Tal índice apesar de simples é normalmente efetivo em determinar modos dominantes de modelos, além de também poder ser utilizado para redução de ordem de sistemas. O IDM além de levar em consideração as constantes de tempo de cada modo, contidas nos pólos, também usa informação sobre a localização dos zeros, sendo capaz de indicar quais pólos são dominantes mesmo quando suas constantes de tempo não são as maiores (pólos mais próximas do eixo imaginário $j\omega$). Este índice leva em consideração informações sobre o regime permanente e transitório do sistema e pode ser obtido para modelos representados na forma de espaço de estados e de funções de transferência.

Seja a função de transferência $G(s)$:

$$G(s) = \frac{b_r s^r + \dots + b_1 s + b_0}{(s - \lambda_n) \dots (s - \lambda_1)} \quad (5.1)$$

Pressupõe-se que $G(s)$ não tem pólos com multiplicidade maior que um e que $n > r$. Logo $G(s)$ pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} G(s) = & \frac{J_1}{(s - \lambda_1)} + \dots + \frac{J_k}{(s - \lambda_k)} + \frac{J_{k+1}}{(s - \lambda_{k+1})} + \frac{J_{k+1}^*}{(s - \lambda_{k+1}^*)} + \dots + \\ & + \frac{J_{k+q}}{(s - \lambda_{k+q})} + \frac{J_{k+q}^*}{(s - \lambda_{k+q}^*)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

sendo que J_i é o i -ésimo resíduo associado ao pólo λ_i , os asteriscos indicam complexo-conjugados, k é o número de pólos reais e q é o número de pares conjugados. Portanto $n = k + 2q$. Assume-se que $Re(\lambda_1) < 0, \forall i$.

O i -ésimo IDM para pólos reais é definido por:

$$\gamma_i \triangleq \frac{-J_i}{\lambda_i}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (5.3)$$

Para pólos complexo-conjugados, tem-se:

$$\begin{aligned} \gamma_i &\triangleq \frac{-[J_{k+l}\lambda_{k+l}^* + J_{k+l}^*\lambda_{k+l}]}{2\lambda_{k+l}\lambda_{k+l}^*} \\ &\triangleq \frac{-Re(J_{k+l}\lambda_{k+l}^*)}{\lambda_{k+l}\lambda_{k+l}^*}, \quad i = k + 2l - 1, k + 2l, \quad l = 1, 2, \dots, q \end{aligned} \quad (5.4)$$

Pólos complexo-conjugados têm IDM idênticos na Equação (5.4), ou seja $\gamma_{k+2l-1} = \gamma_{k+2l}$, $l = 1, 2, \dots, q$. Além disto os IDM podem ser tanto positivos quanto negativos, propriedade desejável uma vez que podem indicar a amplitude da contribuição de cada modo e também sua *direção*.

Para modelos em espaço de estados

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5.5)$$

os IDM para o par de entrada-saída entre a i -ésima entrada e a j -ésima saída são dados por:

$$diag \left[\gamma_1^{ij} \quad \gamma_2^{ij} \quad \dots \quad \gamma_n^{ij} \right] = -Re \left\{ \widehat{C}_j \widehat{B}_i \overline{A}^{-1} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, e; \quad j = 1, 2, \dots, s. \quad (5.6)$$

com e o número de entradas e s o número de saídas e:

$$\begin{aligned}
 \bar{A} &= V^{-1}AV \\
 C_j V &= [\bar{c}_1^j \ \bar{c}_2^j \dots \bar{c}_n^j], j = 1, 2, \dots, s \\
 \hat{C}_j &= \text{diag} [\bar{c}_1^j \ \bar{c}_2^j \dots \bar{c}_n^j] \\
 C &= [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_s]^t \\
 V^{-1}B &= [\bar{b}_1^i \ \bar{b}_2^i \dots \bar{b}_n^i]^t, i = 1, 2, \dots, e \\
 \hat{B}_i &= \text{diag} [\bar{b}_1^i \ \bar{b}_2^i \dots \bar{b}_n^i] \\
 B &= [B_1 \ B_2 \ \dots \ B_e] \\
 V &= [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

Sendo V a matriz de autovetores à direita e os coeficientes \bar{b}_i e \bar{c}_i contêm informações sobre a controlabilidade e a observabilidade do sistema. De acordo com a Equação (5.6), modos fracamente controláveis ou observáveis dificilmente terão IDM significativos, *independentemente* das constantes de tempo envolvidas.

Para sistemas representados na forma de espaço de estados que apresentem apenas uma entrada e uma saída, os IDM da Equação 5.6 coincidem com os das equações 5.3 e 5.4, quando $G(s) = C(sI - A)^{-1}B$. A escolha das ordens dos modelos, assim como a ordenação dos autovalores dominantes de forma decrescente de energia modal podem ser feitas utilizando o IDM. A soma acumulada e normalizada das energias modais de cada sinal indica se a ordem escolhida para o modelo é adequada ou não. Assim sendo, usando o IDM tem-se a idéia da ordem do modelo de identificação que deve ser utilizada no processo de identificação, evitando também o sobredimensionamento de modelos usados no processo de detecção.

5.3.2 Uso do Método de Prony em Conjunto com o IDM

O método de Prony e sua extensão, Método de Prony Multi-Sinais, fornece parâmetros que podem ser utilizados para o cálculo do IDM. Conforme mostrado na Seção 4.2, o método de Prony fornece os autovalores λ_i e seus respectivos resíduos R_i para uma resposta ao

impulso, que pode ser considerado como causa de um *Ringdown* no sistema. Assumindo que não existam autovalores repetidos a resposta da i -ésima saída do sistema pode ser escrita como:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t} \quad (5.8)$$

que ainda pode ser expandida de acordo com uma soma de exponenciais amortecidas:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n 2 |R_i| e^{\sigma_i t} \cos(\omega_i(t) + \angle R_i) \quad (5.9)$$

Com os resíduos e pólos calculados pelo método de Prony ou Prony Multi-Sinais, os IDM podem ser facilmente calculados através do uso das Equações 5.3 e 5.4 para pólos reais e complexos, respectivamente, fornecendo a dominância modal para cada sinal analisado. Resultados da utilização em conjunto destes métodos foram publicados em [175, 176, 23, 177].

5.3.3 Uso de Métodos de Subespaço em Conjunto com o IDM

Na Seção 4.4 foram apresentados os fundamentos básicos da teoria de identificação de sistemas baseados em subespaço de espaço de estados. Como visto, o sistema identificado pode apresentar diferentes estruturas que variam de acordo com a abordagem adotada para a identificação. O caso mais genérico de identificação é o caso onde existe a possibilidade de uso de sinais teste $u(t)$ no sistema e os mesmos podem ser usados sem que haja comprometimento da segurança operativa do respectivo sistema. Como resultado da identificação obtém-se o modelo dado por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + K_f e(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t) \end{aligned} \quad (5.10)$$

que é considerado um modelo *determinístico-estocástico* [31], onde as matrizes A , B , C , D e K_f podem ser identificadas. Normalmente a matriz D não é identificada.

Quando existem apenas medições disponíveis $y(t)$ para serem usadas na identificação, ou seja, não existem dados de entrada $u(t)$ medidos, o processo de identificação se degenera para o caso da identificação de uma *série temporal*. Desta forma apenas as matrizes A , C e K_f são identificadas, resultando no modelo puramente *estocástico* [31] dado por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + K_f e(t) \\ y(t) &= Cx(t) + e(t)\end{aligned}\tag{5.11}$$

onde K_f é a matriz de ganhos do filtro de Kalman. O modelo puramente *estocástico* é o modelo resultante de processos de identificação utilizados nesta tese, pois os dados disponíveis para análise são medições feitas pelo Sistema de Medição Fasorial Sincronizada.

A associação das matrizes do sistema puramente *estocástico* com as equações do IDM na forma de espaço de estados são imediatas. A diferença é que deve-se fazer a troca da matriz B pela matriz K_f nas equações 5.5, 5.6 e 5.7, resultando em:

$$\text{diag} \left[\gamma_1^{ij} \ \gamma_2^{ij} \ \dots \ \gamma_n^{ij} \right] = -\text{Re} \left\{ \widehat{C}_j \widehat{K}_{f_i} \overline{A}^{-1} \right\}, \quad i = 1, 2, \dots, e; \quad j = 1, 2, \dots, s.\tag{5.12}$$

com e o número de entradas e s o número de saídas.

Para o sistema *determinístico-estocástico* dado pela Equação 5.10, devido à propriedade da linearidade de sistemas o IDM pode ser sua equação estendido para:

$$\begin{aligned}\text{diag} \left[\Gamma_1^{ij} \ \Gamma_2^{ij} \ \dots \ \Gamma_n^{ij} \right] &= -\text{Re} \left\{ \widehat{C}_j \widehat{B}_i \overline{A}^{-1} \right\} - \text{Re} \left\{ \widehat{C}_j \widehat{K}_{f_i} \overline{A}^{-1} \right\}, \\ i &= 1, 2, \dots, e; \quad j = 1, 2, \dots, s.\end{aligned}\tag{5.13}$$

com e o número de entradas e s o número de saídas.

A Equação (5.12) é utilizada para ordenação modal nos processos de detecção de modos dominantes neste trabalho e também em [176, 23, 177, 178, 179]. Para a automatização do processo de monitoração contínua de modos eletromecânicos, além do uso do IDM, é necessário um algoritmo de seleção automática dos modos desejados. Detalhes sobre o conjunto de métodos que possibilitam a monitoração não assistida de modos são dados na Seção 5.4.

5.4 PROPOSTA PARA O MONITORAMENTO CONTÍNUO DE MODOS

Dentre diversos artigos publicados sobre monitoração contínua de modos eletromecânicos, desde os mais antigos aos mais recentes [28, 180, 181, 60], somente em [44] é que se menciona e que se propõe um método capaz de realizar tal tarefa. O método de seleção modal proposto em [44] consiste no cálculo da “*pseudo energia*” de modos através de uma função de auto-correlação. O processo de seleção modal consiste em calcular a pseudo energia dos autovalores, calculados por algoritmos de identificação baseados no método de Yule Walker ou pelo N4SID, que estejam em uma determinada região do plano complexo e então ordená-los de acordo com suas respectivas energias.

Nesta tese é *proposto* um método alternativo ao apresentado em [44]. Tal método também realiza a tarefa de monitoração contínua de modos eletromecânicos e é apresentado a seguir.

A fim de transformar o processo de detecção de modos em um processo não assistido, primeiramente é necessário conhecer estimativas das frequências que se deseja rastrear. Como exemplo, para a monitoração do SIN parte-se dos valores de frequências de oscilação dos modos inter-área, estabelecidos por estudos e apresentados na Tabela 5.1.

As estimativas das frequências que se deseja rastrear podem ser obtidas através do uso da Transformada de Fourier (FFT), que indica com picos de diferentes magnitudes a energia dos modos em seu espectro de potência-frequência. Assume-se que os determinados picos em torno das frequências fornecidas pela Tabela 5.1 representem as frequências aproximadas dos modos que se deseja monitorar. De posse destes valores de frequência é necessário o uso de um algoritmo que consiga identificar, no conjunto de autovalores calculado por um método de subespaço de espaço de estados, os autovalores desejados. Tais autovalores devem estar contidos nas respectivas faixas de frequência que se desejada efetuar a monitoração automática e também possuir alta dominância modal.

Todos os autovalores calculados pelo método de subespaço de estados que estiverem dentro de uma faixa de frequência pré-estabelecida Δf_i , ($\Delta f_i = f_i \pm \alpha f_i$, $\alpha \in (0, 1)$), são selecionados e então o IDM indica o autovalor mais dominante na faixa. Este modo é considerado o modo eletromecânico.

O procedimento proposto permite ainda a separação do modo

eletromecânico de outros modos calculados pelo método de subespaço que possuam frequências de oscilação próximas, porém com diferentes taxas de amortecimento e energias modais menores. Este é um fato que ocorre frequentemente durante a análise de dados reais fornecidos pelo SMFS e que se agrava se a frequência de amostragem for baixa. A frequência de amostragem do SMFS que fornece os dados aqui utilizados é de 60 Hz . Porém, como os métodos de subespaço são métodos que analisam grandes blocos de dados, para agilizar o processo de identificação é usual fazer uma reamostragem. A reamostragem para frequências inferiores deve ser realizada após o tratamento prévio de dados (Seção 5.2). Bons resultados, para o método de subespaço, são obtidos para frequências de amostragem *não inferiores* a 20 Hz .

O processo de identificação de picos energia-frequência fornecidos pela FFT pode ser atualizado a cada iteração realizada pelo algoritmo ou após várias iterações, pois modos inter-área possuem frequências de oscilação que são praticamente constantes durante longos períodos. Resultados de diversos testes mostraram que a escolha de uma faixa de frequência ampla (Δf_i) pode eliminar o uso subsequente da FFT uma vez que as faixas de frequência forem selecionadas. Um fluxograma que descreve o algoritmo *proposto nesta tese* para realizar a monitoração contínua de modos eletromecânicos é apresentado na Figura 5.1. Este algoritmo foi nomeado Algoritmo de Subespaço para Rastreamento Automático de Modos (ASRAM).

5.5 MODELAGEM DE SISTEMAS TESTE

O uso de modelos matemáticos para representar sistemas reais é uma prática comum muitas vezes feita a fim de se tentar reproduzir o comportamento qualitativo e quantitativo de sistemas. Tais modelos podem ter sua modelagem representada de diversas formas, cada uma delas com um nível de detalhamento diferente podendo ser capaz ou não de reproduzir determinados fenômenos que ocorrem em sistemas reais.

O surgimento dos SMFS possibilitou que a monitoração de sistemas elétricos de potência pudesse ser feita com grande precisão e riqueza de detalhes, mostrando que há a necessidade de aprimoramento do comportamento dinâmico dos sistemas elétricos de forma mais realista através de modelos. Esta tarefa está diretamente associada à

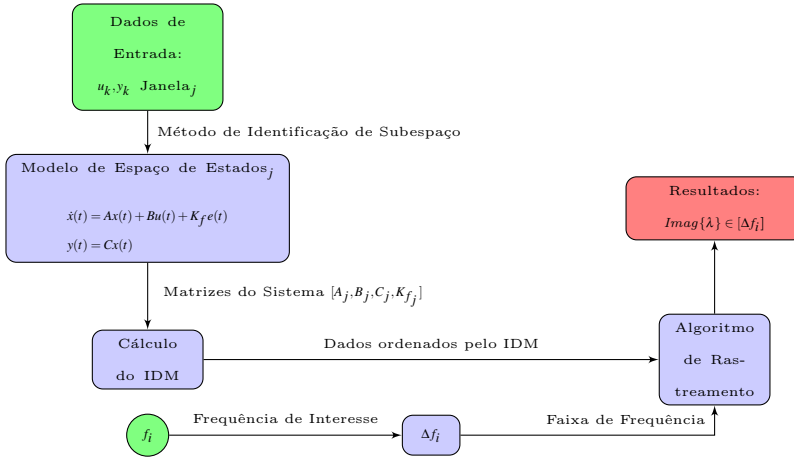


Figura 5.1: Fluxograma do Algoritmo de Monitoração de Modos Eletromecânicos.

monitoração de sua segurança operativa, pois é através destas representações que é possível propor métodos de identificação de sistemas capazes de realizar a monitoração de seus principais modos eletromecânicos ao longo do tempo.

Oscilações em sistemas elétricos de potência podem variar desde os dados de ambiente, causados por variações aleatórias de carga e chaveamentos, a grandes distúrbios. Grandes distúrbios podem originar o surgimento de oscilações que variam desde as lineares e estacionárias até as não-lineares e não-estacionárias. Desta forma a reprodução do comportamento destes sistemas é muito difícil de ser obtida através de simulações. Nos últimos anos artigos foram publicados e também alguns sistemas teste foram propostos, sendo que uma das principais intenções destes estudos é a de reproduzir determinados comportamentos de sistemas de potência de forma mais real, mas para tal algumas premissas foram levadas em consideração:

- Quando as simulações são feitas considerando sistemas lineares [28]:
 - dados de ambiente são reproduzidos através da variação aleatória de pequenas parcelas de cargas do sistema;
 - mudanças modais abruptas são geradas através de alteração

de um modo do sistema;

- Quando as simulações são realizadas considerando modelos não-lineares de sistemas [167]:
 - grandes distúrbios (*ringdown*) são gerados no sistema;

Em simulações realizadas em modelos lineares, foram consideradas apenas mudanças modais abruptas [28]. Já nas simulações com modelos não-lineares, não foram consideradas reproduções de dados de ambiente [167].

Quando o modelo é linear, não é possível reproduzir com exatidão os efeitos de grandes distúrbios (*ringdowns*), como curtos-circuitos seguidos de aberturas de linhas (mudanças topológicas) ou variações modais causadas por mudanças de carregamento.

Ao se realizar simulações de modelos não-lineares é possível variar o ponto de operação do sistema ao longo do tempo, considerando mudanças de carregamento e atuação de Controle Automático de Geração (CAG). Por outro lado, determinar a evolução exata dos principais modos do sistema não-linear ao longo do tempo só é possível através da linearização de tempos em tempos ou a cada iteração.

Neste trabalho de doutorado é *proposto* o uso da simulação de sistemas lineares com parâmetros variantes *Linear Parameter-Varying (LPV) systems* a fim de reproduzir características lineares, porém não-estacionárias de sistemas de potência. Com a utilização de sistemas LPV é possível reproduzir e controlar a exata evolução modal de sistemas ao longo do tempo, possibilitando emular, embora de forma aproximada, aumentos e reduções de níveis de carregamento de sistemas de potência, principais causas do fenômeno da não-estacionariedade.

Também *proposto* neste trabalho, é a modelagem e simulação de um sistema não-linear, não-estacionário que ainda apresenta variações aleatórias de parcelas de cargas dinâmicas. Detalhes sobre estas modelagens e a de sistemas LPV são apresentados nas próximas seções.

Os sistemas teste apresentados nas próximas seções serão utilizados com o intuito de testar o comportamento do conjunto de algoritmos apresentados neste documento. Isto possibilita verificar como tais algoritmos se comportam nestes diferentes tipos de modelos, verificando desvios entre os valores reais e os estimados e servindo como validação. Estes testes também podem dar uma idéia do comportamento dos algoritmos quando aplicados em um sistema real, ou seja, no sistema elétrico brasileiro, cujos dados são amostrados via um SMFS.

A modelagem inicialmente apresentada é a de sistemas teste linearizados em torno de um ponto de operação, que foram até há pouco tempo os únicos tipos de sistemas utilizados para validações de algoritmos para a monitoração contínua de modos eletromecânicos [182, 28, 180, 181, 44].

A segunda representação de modelagem considerada para monitoração de modos eletromecânicos é a de sistemas lineares com parâmetros variantes no tempo. Tal abordagem para foi *proposta* em [178] e os resultados são reapresentados neste documento.

A monitoração contínua de modos eletromecânicos aparentemente nunca foi utilizada em sistemas teste representados por seus modelos não-lineares considerando mudanças de cenário de carga e geração e ainda modelos de cargas dinâmicas variando aleatoriamente. Esta modelagem, teoricamente, é a que mais se aproxima de modelos reais de sistemas elétricos de potência.

Neste capítulo, tais modelagens são brevemente apresentadas e resultados da aplicação do conjunto de algoritmos *propostos* para detecção de modos eletromecânicos podem ser encontrados no Capítulo 6.

5.6 REPRESENTAÇÕES DE MODELOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Nesta seção, a representação dos tipos de modelos utilizados para testar e validar os algoritmos propostos para detecção de modos são apresentados.

5.6.1 Representação de Modelos Lineares

A representação de sistemas cuja modelagem dinâmica é a mais simples pode ser realizada através de um conjunto de equações diferenciais lineares e representada na forma de equações de espaço de estados. Esta representação, dada por (5.14), é válida desde que os distúrbios aplicados ao sistema sejam pequenos, pois normalmente é obtida através da linearização em torno de um ponto de operação. Esta é a representação mais utilizada na literatura de sistemas de potência quando se deseja testar algoritmos de identificação de sistemas. A partir desta modelagem é possível excitar os modos do sistema de diversas formas.

Por exemplo, pode-se alterar pontos de operação, inserir sinais de teste de baixa magnitude, representar variações aleatórias de carga e gerar transitórios através da entrada u_E . Também pode-se representar ruídos em canal de entrada B_L e no de medição D_L através da entrada v_L .

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + B_E u_E + B_L v_L \\ y &= Cx + D_E u_E + D_L v_L\end{aligned}\tag{5.14}$$

Com a aplicação de sinais aleatórios, normalmente Gaussianos ou pseudo-aleatórios, a resposta y é um sinal aleatório “colorido” pela dinâmica do sistema. Quando se aplicam impulsos ou degraus em conjunto com sinais aleatórios, a resposta é multi-modal superposta aos ruídos. Também podem ser efetuadas mudanças modais abruptas chaveando realizações.

5.6.2 Representação de Sistemas Lineares com Parâmetros Variantes

Sistemas Lineares com Parâmetros Variantes ou *Linear Parameter-Varying (LPV) systems* são uma classe especial de sistemas variantes no tempo *Linear Time-Varying (LTV) systems* [183, 184] onde a dependência temporal entra nas equações de estado através de um ou mais parâmetros exógenos $\theta(t)$. Considere um sistema LPV que possua a realização dada por (5.15):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))u(t) + \mu \\ y(t) &= C(\theta(t))x(t)\end{aligned}\tag{5.15}$$

O sistema LPV pode ser considerado como um conjunto de sistemas lineares invariantes no tempo *Linear Time-Invariant (LTI) systems* obtidos pela linearização em torno de diferentes pontos de operação. Controlando os parâmetros exógenos $\theta(t)$, é possível controlar os autovalores da matriz de estados $A(\theta(t))$ a cada iteração. Aplicando uma transformação de similaridade conveniente a um sistema LTI, sua matriz de estados $\mathbf{A}_{n \times n}$ pode ser transformada em uma matriz bloco diagonal.

Uma equação diferencial linear de segunda ordem, tem sua forma

modal dada pela Equação (5.16):

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{u}}(t) \triangleq \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \sigma_0 & \omega_0 \\ -\omega_0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{B}}\hat{\mathbf{u}}(t) \quad (5.16)$$

Um sistema LPV de ordem dois pode ser obtido por:

$$\hat{A}_i(\theta(t)) = \hat{A}_{0_i} + \theta_{1_i}(t)\hat{A}_{\theta_i} = \hat{A}_{0_i} + \theta_{1_i}(t)\hat{A}_{\sigma_i} + \theta_{2_i}(t)\hat{A}_{\omega_i} \quad (5.17)$$

onde:

$$\hat{A}_{0_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{0_i} & \omega_{0_i} \\ -\omega_{0_i} & \sigma_{0_i} \end{bmatrix}; \hat{A}_{\sigma_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_i} & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta_i} \end{bmatrix}; \hat{A}_{\omega_i} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{\theta_i} \\ -\omega_{\theta_i} & 0 \end{bmatrix}$$

Desta forma $\theta_i(t)$ pode ser variado a fim de se controlar o amortecimento modal $\zeta_{\theta_i}(t)$ e a frequência modal $\omega_{\theta_i}(t)$.

Uma matriz \mathbf{A} de um sistema LPV genérico pode ser obtida empilhando diversas matrizes *Bloco Diagonal (diag)*, Equação (5.17), para formar a Equação (5.18).

$$\hat{A}_n(\theta(t)) = \text{diag} [\hat{A}_1(\theta(t)), \hat{A}_2(\theta(t)), \dots, \hat{A}_z(\theta(t))] \quad (5.18)$$

Neste trabalho assume-se que somente a matriz de estados possua parâmetros variantes no tempo e que as entradas exógenas ($u(t)$) da Equação (5.15) são números aleatórios.

5.6.3 Representação de Sistemas Não-Lineares, Não-Estacionários com Comportamento Estocástico

Um sistema elétrico de potência pode ser modelado por um conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares, dado por (5.19), quando se deseja realizar estudos de oscilações eletromecânicas.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, z, u, p) \\ 0 &= g(x, z, u, p) \\ y &= h(x, z, u, p) \end{aligned} \quad (5.19)$$

onde f é um vetor composto por equações diferenciais não-lineares, g é um vetor composto por equações algébricas não-lineares, h um vetor

com as equações de saída e p são parâmetros que variam de forma aleatória. Os vetores de variáveis de estado, variáveis algébricas, de entradas e saídas são, respectivamente, $x \in R^n$, $z \in R^m$, $u \in R^p$, $y \in R^q$ e $p \in R^s$.

Através desta modelagem não-linear, no programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM⁶), é possível fazer com que sistemas elétricos de potência tenham comportamentos não-estacionários a partir de mudanças estruturais ou de mudanças de cenário de carga e geração, possibilitando ainda representar a atuação de controle automático de geração (CAG). Neste programa ainda existem modelos dinâmicos de carga, porém para que pudessem ser emuladas variações aleatórias de carga (dados de ambiente) foi necessário *propor* uma modelagem para cargas que variassem aleatoriamente neste programa. Estas variações aleatórias dos parâmetros p servem para caracterizar um sistema dinâmico estocástico.

Modelagem da Variação Aleatória da Carga

A fim de representar efeitos de dados de ambiente em sistemas não-lineares, foi necessário a implementação de um gerador de números aleatórios no programa ANATEM. O algoritmo utilizado é apresentado a seguir e os números aleatórios gerados por ele são injetados nos modelos de carga dinâmicas já existentes no ANATEM, através dos parâmetros p do sistema de equações (5.19).

O Gerador de Números Aleatórios

A obtenção de números aleatórios é um tópico bastante estudado na teoria de computação. A fim de modelar variações aleatórias em cargas dinâmicas, especificamente no programa ANATEM, é necessário escolher um algoritmo que possa ser implementado no mesmo, além da escolha de um bom algoritmo. Este algoritmo deve ser capaz de gerar uma sequência teoricamente infinita de números aleatórios *estatisticamente independentes* e *uniformemente* distribuídos entre 0 e 1. Este é o ponto chave na obtenção de números aleatórios, pois sequências “estranhas” e “imprevisíveis” não são necessariamente aleatórias.

⁶CEPEL [173].

Durante a busca de tais algoritmos foram encontrados geradores de números aleatórios Gaussianos ⁷ que dificilmente podem ser implementados no ANATEM, e o gerador “de padrão mínimo” ⁸ [186], que é um gerador de números aleatórios altamente testado e recomendado.

Este gerador baseia-se no fato de que $f(z) = 7^5 z \bmod (2^{31} - 1)$ é uma função capaz de produzir uma sequência periódica a cada $2^{31} - 1$ números aleatórios gerados e $\bmod(m)$ significa: pegue o resto da divisão por m . Como é necessário entrar com a *semente inicial (seed)* este é um gerador de números *pseudo-aleatórios*.

Este algoritmo [186] é apresentado a seguir:

Constantes:

$a = 16807,0$;

$m = 2147483647,0$;

$q = 127773,0$; ($q \triangleq m/a$)

$r = 2836,0$; ($r \triangleq m \bmod a$)

Digite a semente inicial (seed)

for $i = 1 \rightarrow n$ **do**

$hi = \text{Trunc}(seed/q)$;

$lo = seed - q * hi$;

$test = a * lo - r * hi$;

if $test > 0,0$ **then**

$seed = test$;

else

$seed = test + m$;

$Random = seed/m$;

end if

end for

e foi implementado na forma de diagrama de blocos via um Controlador Definido pelo Usuário (CDU) no programa ANATEM, servindo para variar aleatoriamente os parâmetros p do sistema de equações (5.19) e assim modular, de forma aleatória, os modelos de carga dinâmicas de tal programa. O algoritmo gerador de números pseudo-aleatórios descrito gera resultados que possuem médias que tendem a valores aproximadamente iguais a 0,5. No programa ANATEM, foram subtraídos os valores 0,5 correspondentes à média da sequência dos números aleatórios gerados pelo algoritmo. Desta forma, nos CDUs desenvolvidos para modelar as respectivas parcelas de cada uma das cargas, só existem

⁷Baseados em Diversos Métodos tais como Monty Python e Ziggurat [185] .

⁸*Minimal Standard Generator*.

variações em torno dos valores nominais. As porcentagens de potência dos modelos dinâmicos de carga, que variam de forma aleatória, podem ser escolhidas pelo usuário.

5.6.4 Comentários

Este capítulo serve para mostrar quais procedimentos devem ser realizados antes da utilização dos métodos de Prony e de algoritmos de subespaço.

A proposta de utilização do IDM na sequência destes métodos de identificação permite que os autovalores possam ser discriminados por suas respectivas energias modais. Através da ordenação modal de todos autovalores identificados, e conhecendo a frequência de oscilação de interesse, foi proposto um algoritmo de rastreamento automático de modos.

As propostas de uma modelagem aleatória de cargas dinâmica para o ANATEM e do uso de sistemas LPV, permitem que dados de ambiente possam ser representados em simulações não-lineares e que sistemas lineares não-estacionários possam ser criados, respectivamente. Com estas propostas é possível testar os métodos e algoritmos apresentados no Capítulo 4 e também o algoritmo de rastreamento automático de modos deste capítulo.

Os testes e validações dos métodos e algoritmos apresentados são apresentados no Capítulo 6.

6 DESEMPENHO DOS ALGORITMOS DE IDENTIFICAÇÃO

Neste capítulo, os métodos de identificação descritos e estendidos no Capítulo 4, juntamente com os algoritmos propostos no Capítulo 5 são testados e empregados no processo de detecção de modos eletromecânicos. Os algoritmos são testados em sistemas teste lineares, lineares com parâmetros variantes no tempo, sistemas não-lineares e sistemas não-lineares e não-estacionários. Após as análises nos sistemas teste, os algoritmos são utilizados para detecção de modos eletromecânicos no Sistema Interligado Nacional (SIN). Para isto dados de um SMFS instalado na baixa tensão são utilizados. Diferentes análises de condições operativas do SIN são realizadas, variando desde análises de dados de ambiente, oscilações sustentadas e a análise de um *blackout*.

6.1 VALIDAÇÕES EM SISTEMAS TESTE

Nesta seção, o desempenho dos métodos de Prony, N4SID, Transformada de Hilbert-Huang e a Transformada de Teager-Huang são avaliados na identificação de modos de oscilação eletromecânicos de um sistema teste de duas áreas. O sistema teste é modelado de diferentes formas e os modelos variam desde o linear com variações aleatórias de carga, passam pelo modelo não-linear com e sem a representação de parcelas de carga do sistema variando aleatoriamente e chegam até a um modelo não-linear e não-estacionário com variações aleatórias de carga. A representação da não-estacionariedade se dá através da alteração do cenário de carga/geração seguido da atuação do Controle Automático de Geração no modelo não-linear.

6.1.1 Sistema Teste

O sistema teste é apresentado na Figura 6.1 [187]. Apesar de ser de pequeno porte, o sistema apresenta grandes desafios quando se deseja detectar os modos eletromecânicos, pois possui amortecimentos elevados (sinais com pouca energia modal) e também dois autovalores praticamente iguais, sendo difícil detectar estes dois modos simultaneamente. Os autovalores do sistema são apresentados na Tabela 6.1

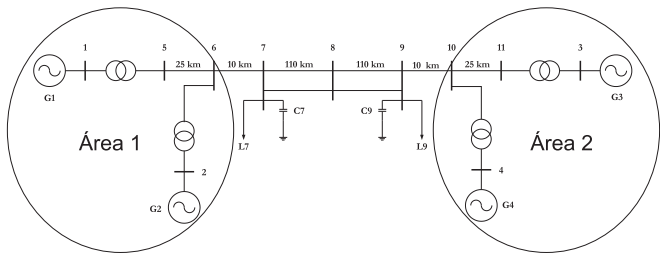


Figura 6.1: Sistema Teste de Duas Áreas.

juntamente com os respectivos fatores de participação. O modo 1 é o modo inter-área e os modos 2 e 3 são os modos locais das áreas 2 e 1, respectivamente.

Tabela 6.1: Autovalores do sistema linearizado.

Modo	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)	Fat. Part
1	$-0,7198 \pm 3,7768j$	18,72	0,601	$\delta 3$
2	$-2,1802 \pm 8,7280j$	24,23	1,389	$\omega 4$
3	$-2,1127 \pm 8,3621j$	24,496	1,331	$\delta 1$

O sistema foi representado no programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos (ANATEM) [173]. Foram incluídos, inicialmente, modelos dinâmicos das turbinas a vapor, reguladores de velocidade, sistemas de excitação e estabilizadores de sistema de potência. Para gerar os sinais, que podem ser considerados dados de ambiente, assumiu-se que 5% das parcelas de carga ativa e reativa do sistema fossem modeladas como cargas dinâmicas que variam de forma aleatória. Para isto foi usado o algoritmo apresentado em [186], onde as respectivas seqüências de números aleatórios, foram geradas por uma *semente inicial* diferente. Este algoritmo pode ser encontrado na Seção 5.6.3. Para representar não-estacionariedades, na Seção 6.1.4 também foi considerada a modelagem de um Controle Automático de Geração (CAG) a fim de controlar a frequência e intercâmbio de potência na interligação devido a mudanças em cenários de carga e geração ao longo da simulação dinâmica.

6.1.2 Escolha e tratamento dos dados

A detecção dos modos do sistema teste é feita a partir da análise dos dados de simulações não-lineares. As variações no sistema são causadas por um curto-circuito trifásico franco na barra 7, com duração de 120 ms sem a retirada de linhas de transmissão, ou seja, um *Ringdown*, e também pelos dados de ambiente, gerados pelas variações das parcelas de cargas aleatórias. Os instantes de aplicação ou não de curto-circuitos na barra 7 dependem das janelas analisadas, que são apresentados a seguir.

Foram escolhidas 5 janelas, apresentadas na Tabela 6.2. A Janela 1 tem duração de 10s e os dados sob análise foram gerados pelo curto-circuito com duração de 120 ms (*Ringdown*) aplicado na barra 7 no instante 200 ms, sendo que as cargas do sistema teste foram representadas com 100% de potência constante. A Janela 2 tem a duração de 2 minutos e é composta por dados de ambiente sendo que no instante de 50s o mesmo distúrbio usado na Janela 1 foi aplicado. As janelas 3 a 5 contém apenas os dados de ambiente.

Tabela 6.2: Identificação das janelas de dados.

Janelas	Tempo [s]
1	0 a 10
2	0 a 120
3	0 a 300
4	0 a 600
5	600 a 1200

Os sinais usados no processo de detecção foram escolhidos por serem facilmente monitorados pelo SMFS. Estes sinais são as diferenças angulares dos fasores de tensão de sequência positiva, $\Delta\theta_{ij}$, entre as barras 1 e 3 e barras 2 e 4 do sistema da Figura 6.1, as frequências das barras terminais de geração f_i e os fluxos de potência ativa entre as barras 7 e 8 e barras 8 e 9, representados por Fluxo_{ij} .

Para melhorar o processo de detecção de modos deve-se eliminar as tendências e componentes contínuas dos sinais, filtrar os dados e normalizá-los. Desta forma, os procedimentos para pré-tratamento dos dados apresentados na Seção 5.2 foram utilizados.

Dentre os algoritmos de detecção descritos no Capítulo 4, o método de Prony multi-sinais, a Transformada de Hilbert-Huang e a Transformada de Teager-Huang são aplicados na análise do *Ringdown*, ou seja, na Janela 1. O N4SID, que pode ser empregado tanto para

analisar *Ringdowns* e dados de ambiente é aplicado em todas as janelas da Tabela 6.2.

A escolha das ordens dos modelos e a ordenação dos autovalores dominantes de forma decrescente de energia modal foram feitas utilizando o índice de dominância modal (IDM) [174], apresentado na Seção 5.3. A soma acumulada e normalizada das energias modais de cada sinal indica se a ordem escolhida para o modelo é adequada ou não.

6.1.3 Resultados da Detecção de Modos

Nas análises feitas para detecção dos modos, embora a energia modal dada pela soma acumulada dos IDM tenha fornecido ordens inferiores a 50, a ordem máxima possível aplicada à Janela 1 foi escolhida para o método de Prony multi-sinais. A ordem máxima (100) equivale à metade do número total de amostras da Janela 1 e faz com que este método obtenha resultados mais exatos ¹. Para o N4SID, a ordem do modelo escolhida para todas as janelas foi 30, pois segundo a soma acumulada dos MDI, na maioria dos casos, no máximo apenas 20 autovalores continham energia modal numericamente diferente de zero ².

Inicialmente, a detecção é feita usando os métodos de Prony e o N4SID para a Janela 1, onde existe apenas o *Ringdown*. Todas as cargas são representadas por potência constante e os sinais não foram previamente filtrados. Os resultados são apresentados na Tabela 6.3 e na Tabela 6.4. O modo inter-área possui maior energia modal e é bastante observável e sua detecção é bastante similar aos autovalores encontrados na Tabela 6.1, mostrando que os dois métodos tiveram bom desempenho.

Foi atribuído o nome modo 2* aos autovalores detectados na Ta-

¹A aderência do sinal reconstruído após aplicação do método de Prony está diretamente relacionada à ordem do modelo, que por sua vez está associada ao número de amostras (o número de amostras equivale à ordem do modelo). No método de Prony, a aderência do sinal reconstruído é “exata” até no máximo a metade do número total de amostras do sinal.

²A determinação da ordem de modelos para a maioria dos métodos de identificação de sistemas é uma questão não trivial, assim deve-se partir do princípio que o modelo não tenha uma ordem muito reduzida pois assim não terá a *complexidade estrutural* necessária para reproduzir a dinâmica do sistema e nem muito elevada, o que acarreta em estimações mal condicionadas [99].

Tabela 6.3: Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso sem filtro e sem carga dinâmica.

Prony - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	$-0,7151 \pm 3,8146j$	18,40	0,607
f_i	100	$-0,6999 \pm 3,8086j$	18,10	0,606
Fluxo _{ij}	100	$-0,7031 \pm 3,8086j$	18,20	0,606
N4SID - Modo 1				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0,6914 \pm 3,8074j$	17,90	0,606
f_i	30	$-0,6980 \pm 3,8019j$	18,10	0,605
Fluxo _{ij}	30	$-0,6880 \pm 3,8029j$	17,80	0,605

bela 6.4 devido aos dois métodos de detecção encontrarem apenas um autovalor, que neste caso representa os autovalores correspondentes aos modos locais 2 e 3 da Tabela 6.1, que são bastante parecidos. Neste caso, o N4SID teve um desempenho inferior ao método de Prony multi-sinais por não detectar nenhum modo com energia modal significativa ³ quando analisados os sinais de Fluxo_{ij}. Isto pode ser justificado devido ao fato de os fluxos analisados fazerem parte da interligação das duas áreas, não sendo portanto analisado nenhum sinal com alta observabilidade de modos locais e conseqüentemente alta dominância modal, o que aparentemente afeta mais o N4SID. O método de Prony multi-sinais também detectou o modo 2* com menor exatidão para a análise dos Fluxo_{ij} devido ao mesmo fato.

Tabela 6.4: Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso sem filtro e sem carga dinâmica.

Prony - Modo 2*				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	$-2,0887 \pm 8,3983j$	24,10	1,337
f_i	100	$-2,1451 \pm 8,4787j$	24,50	1,349
Fluxo _{ij}	100	$-1,8874 \pm 8,1692j$	22,50	1,300
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-1,5079 \pm 8,5123j$	17,40	1,355
f_i	30	$-2,3111 \pm 8,3975j$	26,50	1,336
Fluxo _{ij}	30	—	—	—

Nas Tabelas 6.5 e 6.6 estão os resultados das análises dos mesmos sinais das Tabelas 6.3 e 6.4, mas agora com a inclusão de filtros, Seção 5.2, para testar a influência dos mesmos no processo de detecção. Comparando-se as Tabelas 6.3 e 6.5 e as Tabelas 6.4 e 6.6, respectivamente, nota-se que o filtro inserido não causou alterações significativas

³Quando não há modos detectados, a notação para tal nas tabelas é dada por um traço (—).

no processo de detecção do modo 1 e aparentemente melhorou o processo de detecção do modo 2*, podendo ter atenuado sinais de alta frequência nos instantes iniciais do transitório.

Tabela 6.5: Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso com filtro e sem carga dinâmica.

Prony - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	$-0,6989 \pm 3,8139j$	18,00	0,607
f_i	100	$-0,6978 \pm 3,8081j$	18,00	0,606
Fluxo $_{ij}$	100	$-0,7058 \pm 3,8120j$	18,20	0,607
N4SID - Modo 1				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0,6894 \pm 3,8082j$	17,80	0,606
f_i	30	$-0,6943 \pm 3,8049j$	18,00	0,606
Fluxo $_{ij}$	30	$-0,7285 \pm 3,7825j$	18,90	0,602

Tabela 6.6: Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso com filtro e sem carga dinâmica.

Prony - Modo 2*				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	$-2,1696 \pm 8,4702j$	24,80	1,348
f_i	100	$-2,0190 \pm 8,4541j$	23,20	1,345
Fluxo $_{ij}$	100	$-2,0372 \pm 8,2996j$	23,80	1,321
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-1,6600 \pm 8,5702j$	19,00	1,364
f_i	30	$-2,0194 \pm 8,1596j$	24,00	1,299
Fluxo $_{ij}$	30	—	—	—

Nas Tabelas 6.7 e 6.8 estão os resultados da detecção de modos para a Janela 1, levando em consideração agora o *Ringdown* e os dados de ambiente, sendo que os sinais foram previamente filtrados. Nota-se que as variações aleatórias de carga têm grande influência no processo de detecção. Para o modo 1 na Tabela 6.7 houve redução na frequência de oscilação e também uma maior variação na parte real dos autovalores, fato que não ocorria anteriormente. Já na detecção do modo 2*, Tabela 6.8, que apresenta menor energia modal, os resultados foram deteriorados e para dois conjuntos de sinais o método de Prony multi-sinais não detectou autovalores na faixa de frequência dos modos locais 2 e 3 da Tabela 6.1.

As próximas análises levam em consideração janelas com maiores intervalos de tempo de duração incluindo dados de ambiente. Logo, somente o N4SID será considerado nas análises.

Na Tabela 6.9 estão as análises para a Janela 2, da Tabela 6.2, que tem 2 minutos de duração e o mesmo *Ringdown* da Janela 1 que se

Tabela 6.7: Detecção do modo 1 para a Janela 1. Caso com filtro e com carga dinâmica.

Prony - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	$-0,6440 \pm 3,4485j$	18,40	0,549
f_i	100	$-0,8728 \pm 3,5414j$	23,90	0,564
Fluxo _{ij}	100	$-0,5602 \pm 3,4303j$	16,10	0,546
N4SID - Modo 1				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0,3371 \pm 3,4982j$	9,59	0,557
f_i	30	$-0,7352 \pm 3,204j$	22,40	0,510
Fluxo _{ij}	30	$-0,3735 \pm 3,4245j$	10,80	0,545

Tabela 6.8: Detecção do modo 2* para a Janela 1. Caso com filtro e com carga dinâmica.

Prony - Modo 2*				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	100	—	—	—
f_i	100	—	—	—
Fluxo _{ij}	100	$-1,3408 \pm 9,0997j$	14,60	1,448
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-1,0129 \pm 8,0309j$	12,50	1,279
f_i	30	$-0,1950 \pm 8,2023j$	2,38	1,305
Fluxo _{ij}	30	—	—	—

inicia no instante 50s. Percebe-se que o modo 1 foi detectado com precisão aceitável e mais uma vez a detecção do modo 2* ficou prejudicada devido à baixa observabilidade e dominância modal dos modos 2 e 3 nos sinais. Com estes resultados percebe-se a influência do aumento do tamanho da janela no N4SID, pois a precisão da detecção aumentou. Para avaliar a influência do tamanho das janelas no processo de identificação, nas próximas análises, janelas 3 a 5, o tamanho das janelas e variado, mas somente dados de ambiente são considerados nos sinais. Esta condição representa a situação típica de operação de um sistema elétrico de potência real.

Tabela 6.9: Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 2. Caso com filtro e com carga dinâmica.

N4SID - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0,6441 \pm 3,5039j$	18,10	0,558
f_i	30	$-0,7145 \pm 3,5993j$	19,50	0,573
Fluxo _{ij}	30	$-0,7026 \pm 3,5836j$	19,20	0,570
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-1,2496 \pm 9,1052j$	13,60	1,449
f_i	30	$-1,4021 \pm 8,3462j$	16,60	1,328
Fluxo _{ij}	30	—	—	—

A fim de ilustrar o comportamento do sistema teste devido as variações aleatórias de carga, na Figura 6.2 as variações de frequência dos geradores são apresentadas. Estas variações foram originadas pelo modelo de carga proposto na Seção 5.6, que foi implementado no programa ANATEM.

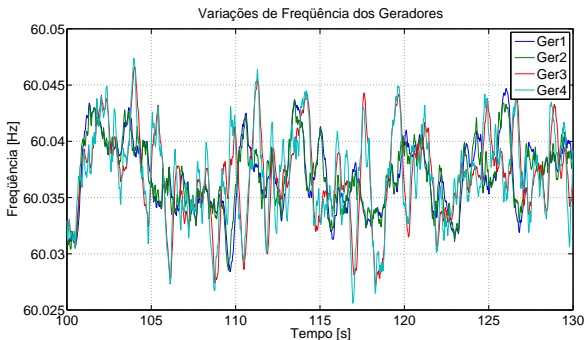


Figura 6.2: Variações de Frequência dos Geradores para os Dados de Ambiente.

Como as janelas começam a ser maiores, o tempo de processamento para obter os modos aumenta. Assim, após o processo de filtragem, são feitas reamostragens para uma frequência de 5 Hz , que obedece ao critério de Nyquist para a faixa de frequência de interesse. Originalmente a frequência de amostragem era de 40 Hz .

Na Tabela 6.10 estão os resultados das análises de detecção para a Janela 3. O método N4SID foi capaz de detectar o modo 1 e mais uma vez apresentou grande sensibilidade na presença de dados de ambiente, e não foram detectados autovalores na faixa de frequência próxima dos modos locais 2 e 3, como mostrado na Tabela 6.1, que apresentassem dominância modal significativa.

Os resultados das análises de detecção dos modos para a Janela 4, que tem 10 minutos estão apresentados na Tabela 6.11. O N4SID foi capaz de detectar o modo 1 e apresentou resultados melhores que os encontrados na Tabela 6.10, além de conseguir detectar o modo 2^* , que mais uma vez apresentou grande sensibilidade à presença de dados de ambiente.

Foram analisados mais 10 minutos de dados, correspondentes à Janela 5 e os resultados podem ser encontrados na Tabela 6.12. Quali-

Tabela 6.10: Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 3. Caso com filtro e com carga dinâmica.

N4SID - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0.5689 \pm 3.5963j$	15,60	0,572
f_i	30	$-0.4713 \pm 3.6866j$	12,70	0,587
Fluxo $_{ij}$	30	$-0.8875 \pm 3.9286j$	22,00	0,625
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	—	—	—
f_i	30	—	—	—
Fluxo $_{ij}$	30	—	—	—

Tabela 6.11: Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 4. Caso com filtro e com carga dinâmica.

N4SID - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0.7819 \pm 3.6329j$	21,00	0,578
f_i	30	$-0.6768 \pm 3.7947j$	17,60	0,604
Fluxo $_{ij}$	30	$-0.6917 \pm 4.1739j$	16,30	0,664
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-1.649 \pm 8.8171j$	18,40	1,403
f_i	30	$-1.4515 \pm 7.5854j$	18,80	1,207
Fluxo $_{ij}$	30	$-1.2689 \pm 10.2264j$	12,30	1,627

tativamente os resultados podem ser comparados aos apresentados na Tabela 6.11, porém os resultados apresentados nas tabelas 6.11 e 6.12 estimam valores modais de forma pontual ou local e podem representar estimativas com grandes desvios dos valores reais (dispersões na identificação). Esclarecimentos sobre estes fatos podem ser encontrados na próxima seção, onde se apresenta a evolução modal do sistema a cada 5 segundos.

Tabela 6.12: Detecção dos modos 1 e 2* para a Janela 5. Caso com filtro e com carga dinâmica.

N4SID - Modo 1				
Sinais	Ordem	Autovalores	ζ (%)	f (Hz)
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-0.6403 \pm 3.8128j$	16,60	0,607
f_i	30	$-0.6821 \pm 4.1793j$	16,10	0,665
Fluxo $_{ij}$	30	$-0.7297 \pm 4.0085j$	17,90	0,638
N4SID - Modo 2*				
$\Delta\theta_{ij}$	30	$-2.9499 \pm 6.9334j$	39,20	1,103
f_i	30	$-2.3073 \pm 7.9818j$	27,80	1,270
Fluxo $_{ij}$	30	$-1.315 \pm 7.8801j$	16,50	1,254

As análises feitas até o momento consideraram os efeitos de grandes distúrbios com ou sem a presença de dados de ambiente, os efeitos dos tamanhos das janelas, utilização ou não de filtros e diferentes ti-

pos de sinais no processo de identificação. Notou-se que o aumento das janelas tende a melhorar a identificação para o N4SID e que a presença de “ruídos” ou dados de ambiente podem influenciar o processo de identificação ⁴. Para se poder ter uma melhor idéia do comportamento do N4SID no processo de identificação, o conjunto de algoritmos apresentado no Capítulo 5 é empregado para realizar o rastreamento automático dos modos do sistema teste de forma contínua. Os resultados destas análises são apresentados na próxima seção.

6.1.4 Rastreamento Contínuo de Modos do Sistema Teste

Para se testar como o N4SID se comporta durante processos contínuos de identificação modal, o conjunto de algoritmos proposto no Capítulo 5 é utilizado. A monitoração de modos é feita utilizando diversas janelas deslizantes de 10 minutos, sendo que a atualização das mesmas é feita regularmente a cada intervalo de 5 s, quando os resultados da detecção são atualizados. Os sinais utilizados na detecção são as frequências das barras terminais de cada gerador da Figura 6.1. O N4SID possui ordem 30 e um método de mínimos quadrados ⁵ é usado para ajustar uma curva a partir do conjunto de pontos fornecidos a cada 5 s.

Na primeira etapa, o rastreamento automático de modos é feito considerando uma janela de 30 minutos de duração, sendo que os resultados começam a ser fornecidos apenas após 600 segundos. Primeiramente é considerado o modelo não-linear do sistema teste com variações aleatórias de 5% de carga. Logo após o sistema teste com modelos dinâmicos de carga é linearizado e modelado na forma de equações de estado ⁶ onde sinais aleatórios são utilizados nas devidas entradas. Os resultados da monitoração do modelo não-linear e linearizado podem ser comparados, já que as variações são de pequena magnitude e o sistema é estacionário.

Em seguida, o algoritmo de rastreamento automático é testado novamente no sistema teste, porém são geradas não-estacionariedades no modelo não-linear composto por cargas dinâmicas que variam ale-

⁴Parte dos resultados apresentados nesta seção foram publicados em [176].

⁵O método dos mínimos quadrados utilizado compõe a função *smooth* do Matlab.

⁶Quando se considera a modelagem dinâmica de cargas existem mudanças na matriz de estados **A** e na matriz de entradas **B**.

atoriamente. As não estacionariedades são originadas por aumento de carga e geração seguidos ainda pela atuação do Controle Automático de Geração (CAG). O sistema foi modelando no programa ANATEM. Devido aos tempos envolvidos no processo de tomada de carga e atuação do CAG, a simulação tem duração de 80 minutos. Novamente as janelas deslizantes têm 10 minutos e os resultados são atualizados a cada 5 s.

Monitoramento dos Sistemas Estacionários Não-linear e Linear com Variações Aleatórias de Carga

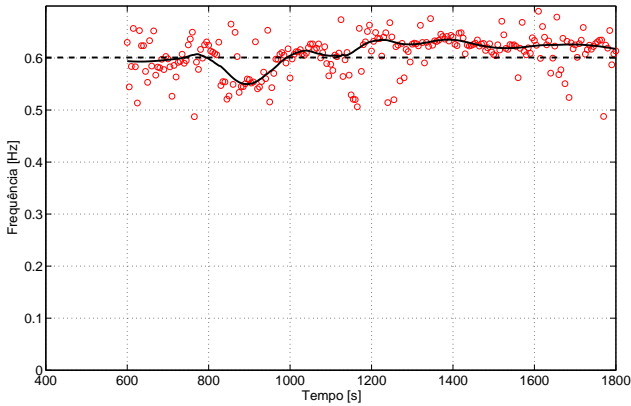
Neste subseção, o algoritmo de identificação ASRAM, tem seu desempenho testado em sistemas não-lineares e lineares. Um dos objetivos é verificar se a identificação feita no modelo linearizado pode ser utilizada para substituir a identificação feita no modelo não-linear em casos onde não há mudanças de ponto de operação do sistema.

A aplicação do algoritmo de detecção automática de modos no modelo não-linear com variações aleatórias de 5% da parcela total de cargas dinâmicas resultou nas figuras 6.3(a) e 6.3(b). As linhas tracejadas representam os valores de frequência e amortecimento extraídos da Tabela 6.1 para o modo 1 (inter-área). Os valores ajustados pelo método de mínimos quadrados indicam que, apesar da existência de dispersão modal em torno do valor real, os valores de frequência e amortecimento foram estimados com erros relativamente pequenos.

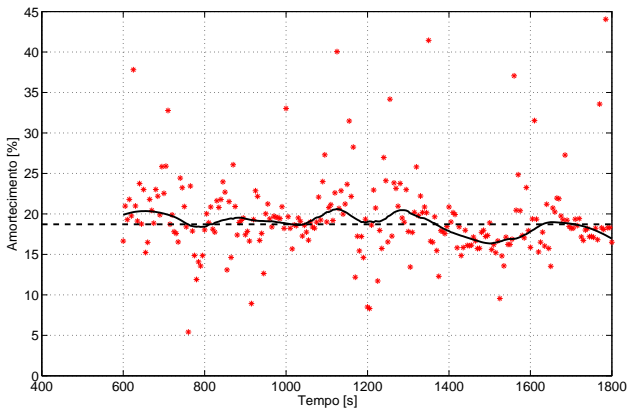
Nas figuras 6.4(a) e 6.4(b) estão os valores detectados para a frequência de oscilação e o amortecimento, respectivamente, do modo 1 para o sistema linearizado.

A curva ajustada através do método de mínimos quadrados para o amortecimento, Figura 6.4(b), ficou abaixo do amortecimento real do sistema, representado pela linha tracejada. Quando se faz a mesma comparação para os valores ajustados para a frequência de oscilação, Figura 6.4(a), nota-se que os desvios foram maiores no final do processo de rastreamento.

Os valores médios de frequência de oscilação do modelo não-linear, Figura 6.5(a), e do modelo linear, Figura 6.5(b), ficaram em torno de 0,62 Hz, próximos à frequência de oscilação real do modo inter-área, que é de 0,601 Hz. Os valores médios de amortecimento foram de 19% para o modelo não-linear, Figura 6.5(c), e de 16% para



(a) Frequência do Modo Inter-área - Modelo Não-linear.

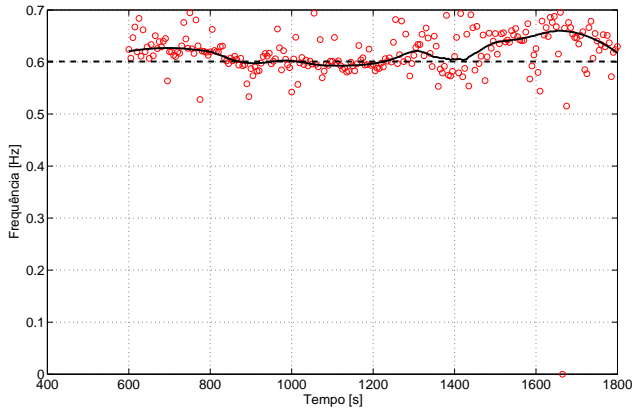


(b) Amortecimento do Modo Inter-área - Modelo Não-linear.

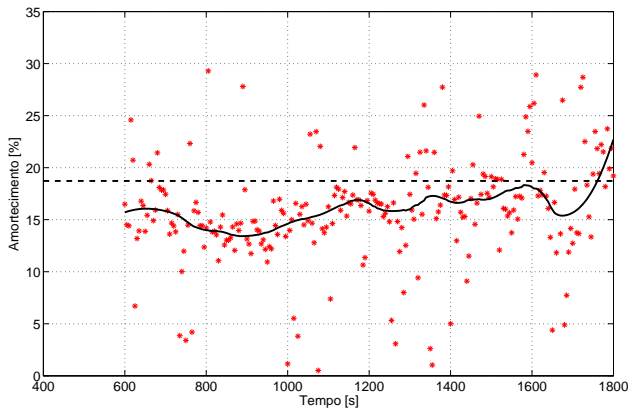
Figura 6.3: Monitoramento do Modo Inter-área - Modelo Não-linear.

o modelo linear, Figura 6.5(d), sendo que de acordo com a Tabela 6.1, o valor real é de 18,72%.

Considerando estes resultados nota-se, que para o modo inter-área, a identificação do modelo não-linear foi mais próxima ao valor real que a do modelo linear.



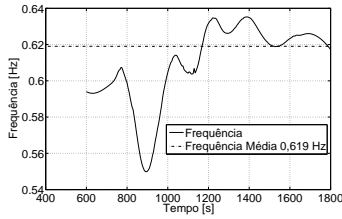
(a) Frequência do Modo Inter-área - Modelo Linear.



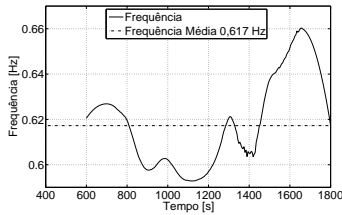
(b) Amortecimento do Modo Inter-área - Modelo Linear.

Figura 6.4: Monitoramento do Modo Inter-área - Modelo Linear.

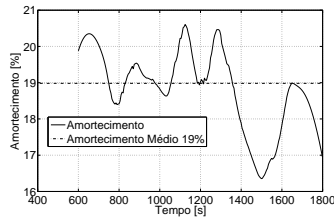
A monitoração dos modos locais (modos 2 e 3 da Tabela 6.1) é mais problemática, pois além destes amortecimentos serem superiores a 24%, os modos locais (Gerador 1 oscilando contra Gerador 2 e Gerador 3 oscilando contra Gerador 4) têm frequências de oscilação e amortecimentos próximos uns aos outros. Isto se deve ao fato de o sistema teste



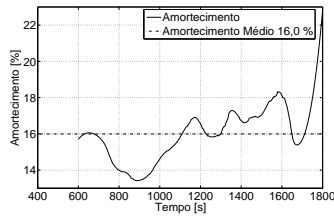
(a) Frequência do Modo Inter-área - Modelo Não-linear.



(b) Frequência do Modo Inter-área - Modelo Linear.



(c) Amortecimento Modo Inter-área - Modelo Não-linear.



(d) Amortecimento Modo Inter-área - Modelo Modelo Linear.

Figura 6.5: Comparações entre os Modelos Não-linear e Linear - Modo Inter-área.

da Figura 6.1 ser um sistema simétrico. Os métodos de identificação dificilmente apresentam resolução suficiente para distinguir modos tão próximos.

Para a monitoração do sistema não-linear e linear, os modos locais da área 1 e da área 2 têm seus respectivos valores “reais” de frequência e de amortecimento representados por linhas pontilhadas e tracejadas nas figuras 6.6 e 6.7, respectivamente.

Tanto para o modelo não-linear quanto para o linear, as frequências de oscilação detectadas estão mais próximas da frequência real do modo local 1, conforme as figuras 6.6(a) e 6.7(a). Os amortecimentos detectados para os modos locais 1 e 2 são praticamente iguais e existe grande dispersão em sua identificação, conforme pode ser visto nas figuras 6.6(b) e 6.7(b).

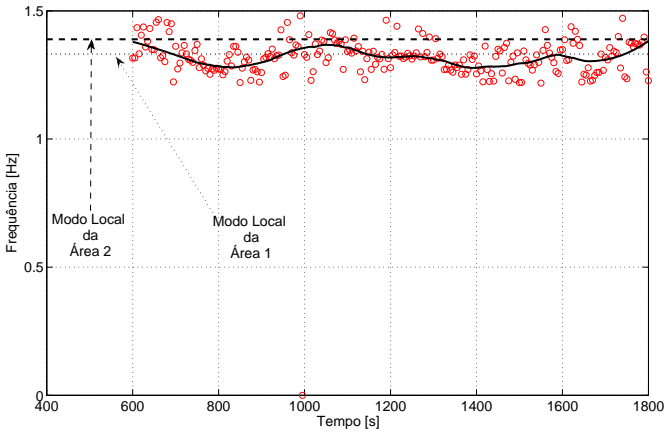
Os valores de frequência e amortecimento, juntamente com seus respectivos valores médios podem ser encontrados na Figura 6.8. Os valores médios de frequência de oscilação para o modelo não-linear (Figura 6.8(a)) e para o modelo linear (Figura 6.8(b)) ficaram em torno de 1,32 Hz, também mais próximos à frequência de oscilação real do modo local 1, que é de 1,33 Hz do que a do modo 2 (1,389 Hz).

Os valores médios de amortecimento ficaram em torno de 8 e 3,5 pontos percentuais abaixo do valor real do amortecimento do modo local 1, que é de $\approx 24,5\%$ para o modelo não-linear (Figura 6.8(c)) e para o modelo linear (Figura 6.8(d)), respectivamente.

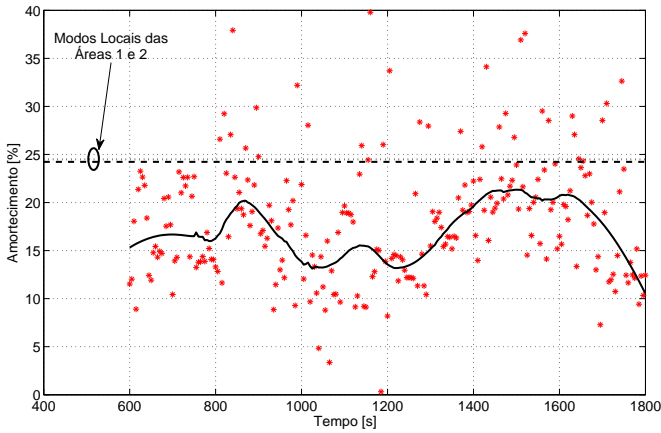
Com estes resultados, os valores estimados do modo local para o modelo linear ficaram mais próximos aos valores reais do que para o modelo não-linear. Como as diferenças não foram tão significativas, não se pode concluir se melhores resultados de rastreamento são obtidos ao se analisar sistemas com modelos não-lineares ou com modelos linearizados.

Monitoramento do Sistema Não-estacionário e Não-linear com Variações Aleatórias de Carga

A fim de introduzir não-estacionariedades no sistema teste da Figura 6.1 para produzir mudanças em seu modo inter-área, foi modelado um CAG. A principal finalidade do CAG é eliminar desvios de frequência em sistemas elétricos de potência e sua modelagem na simulação também possibilita alterar a potência de intercâmbio entre áreas.



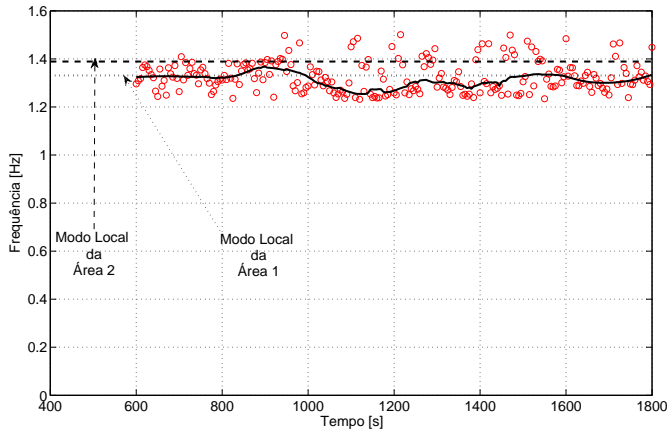
(a) Frequência do Modo Local - Modelo Não-linear.



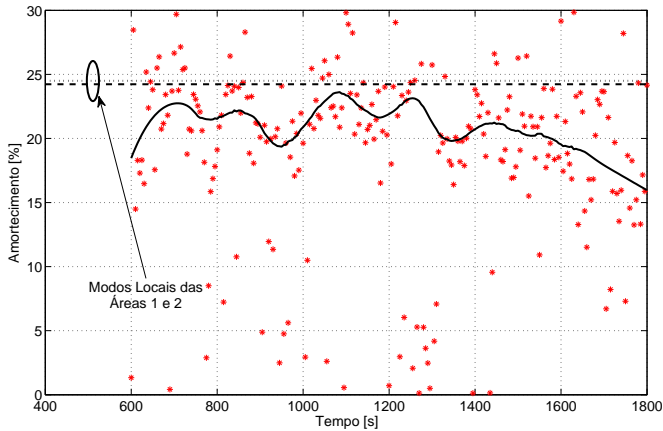
(b) Amortecimento do Modo Local - Modelo Não-linear.

Figura 6.6: Monitoramento dos Modos Locais - Modelo Não-linear.

Para reproduzir uma situação operativa parecida com a de um sistema real, a carga na Área 2 foi aumentada em 15% durante um intervalo de tempo de 10 minutos, sendo que tal aumento foi feito em 10 parcelas de 1,5% igualmente espaçadas no tempo. No mesmo instante



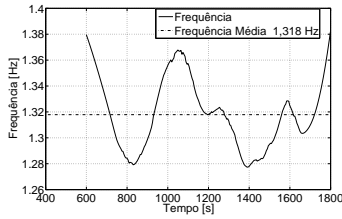
(a) Frequência do Modo Local - Modelo Linear.



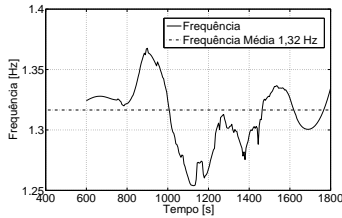
(b) Amortecimento do Modo Local - Modelo Linear.

Figura 6.7: Monitoramento dos Modos Locais - Modelo Linear.

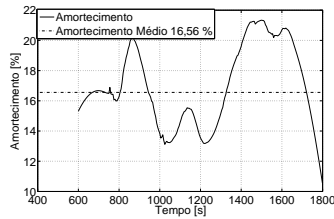
em que o aumento de carga se inicia, foi feita uma mudança na referência da potência de intercâmbio do CAG, o que possibilitou *aumentar* o intercâmbio de potência da Área 1 para a Área 2 com finalidade de reduzir o amortecimento do modo inter-área. Estas mudanças se inicia-



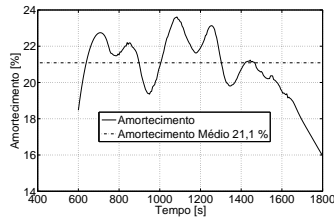
(a) Frequência do Modo Local - Modelo Não-linear.



(b) Frequência do Modo Local - Modelo Linear.



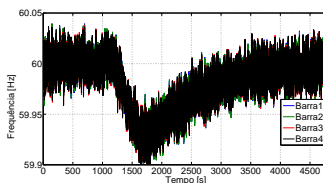
(c) Amortecimento do Modo Local - Modelo Não-linear.



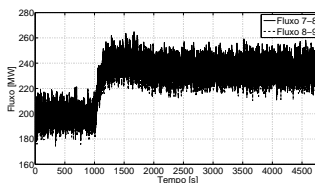
(d) Amortecimento do Modo Local - Modelo Linear.

Figura 6.8: Comparações entre os Modelos Não-linear e Linear - Modo Local.

ram em 1000 s e por volta de 4000 s o Erro de Controle de Área (ECA) tendia a zero. As variações de frequência do sistema e a mudança de fluxo de intercâmbio no circuito 1, que liga as Barras 7, 8 e 9 da Figura 6.1, podem ser vistas nas figuras 6.9(a) e 6.9(b), respectivamente. As variações de potência mecânica nas máquinas do sistema podem ser visualizadas na Figura 6.10.



(a) Variações de Frequência.



(b) Variação de Fluxo na Interligação - Circuito 1.

Figura 6.9: Atuação do Controle Automático de Geração.

Aplicando o algoritmo de rastreamento automático de modos (ASRAM) aos sinais de variação de frequência do sistema (Figura 6.9(a)), os modos inter-área e local do sistema podem ser monitorados. Devido à simulação ter sido realizada considerando o modelo não-linear do sistema e diante da existência de não-estacionariedades, os valores exatos dos modos eletromecânicos de interesse do sistema só podem ser conhecidos se, de tempos em tempos, o sistema for linearizado em torno de cada ponto de operação. Desta forma os resultados apresentados para os rastreamentos modais só podem ser comparados quantitativamente aos obtidos nas figuras 6.3(a) e 6.3(b) ⁷, que são os resultados da simulação do mesmo sistema, porém sem grandes mudanças no ponto de operação (sistema não-linear e estacionário). Por

⁷Vale lembrar que o intervalo de monitoração das referidas figuras é de 30 minutos, enquanto que o do sistema não-estacionário é de 80 minutos.

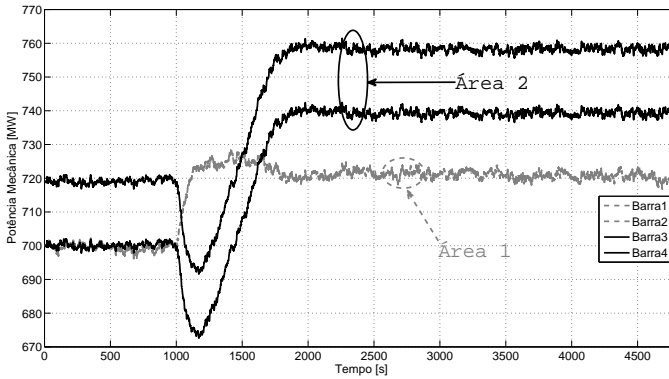


Figura 6.10: Variações de Potência Mecânica - Redespacho e Atuação CAG.

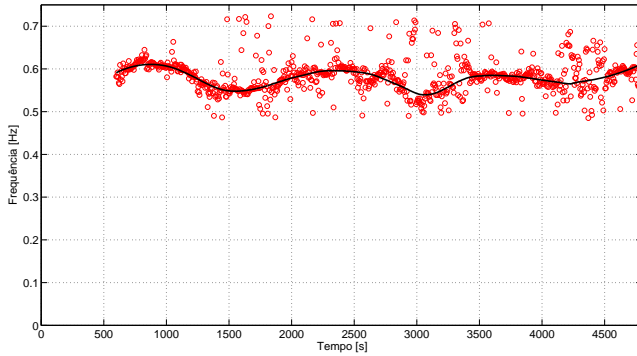
outro lado sabe-se que com o aumento de intercâmbio entre duas áreas interligadas, o amortecimento do modo inter-área tende a diminuir. Como o intercâmbio, após as mudanças no sistema, passou de 400 MW para 476 MW é de se esperar que ao longo do tempo o amortecimento do modo inter-área não atinja valores superiores a 19% (Tabela 6.1). Desta forma o resultado do rastreamento do amortecimento do modo inter-área da Figura 6.11(b) pode ser considerado coerente. Com as grandes mudanças em relação ao ponto de operação inicial do sistema, espera-se também maiores variações da frequência de oscilação do modo inter-área, fato que pode ser notado na Figura 6.11(a).

Em relação aos resultados da monitoração dos modos locais, que são *dois* praticamente idênticos, apesar da grande dispersão nos valores detectados para a frequência modal (Figura 6.12(a)), o valor ajustado pelo método dos mínimos quadrados apresenta um valor médio de $1,35\text{ Hz}$. Este valor está entre os valores de frequência de oscilação dos modos 2 e 3 da Tabela 6.1. Devido a estes fatos e à grande dispersão modal da Figura 6.12(b), os resultados obtidos para o amortecimento podem ser levados em consideração apenas como estimativa média.

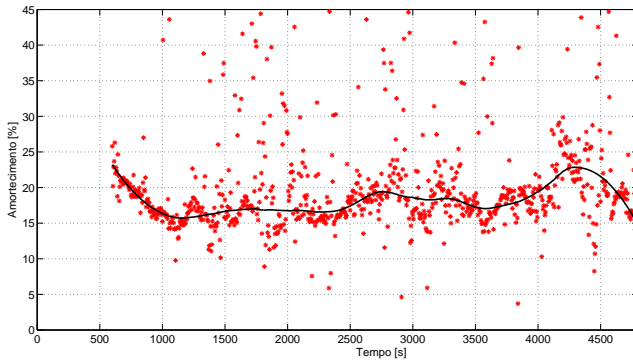
Uma alternativa para introduzir não-estacionariedades em sistemas e conhecer a evolução de seus modos, sem necessidade de linearizações, é a utilização de sistemas LPV.

A proposta de rastreamento modal de sistemas elétricos de potência usando sistemas LPV foi feita durante esta tese e publicada em

[178]. Na Seção 6.2 o comportamento do algoritmo de rastreamento automático de modos é avaliado, em sistemas LPV e também no SIN.



(a) Frequência Modal do Modo Inter-área - Redespacho e Atuação do CAG.

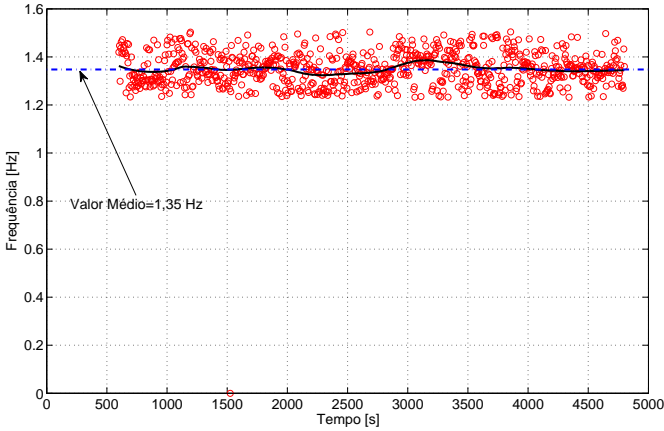


(b) Amortecimento Modal do Modo Inter-área - Redespacho e Atuação do CAG.

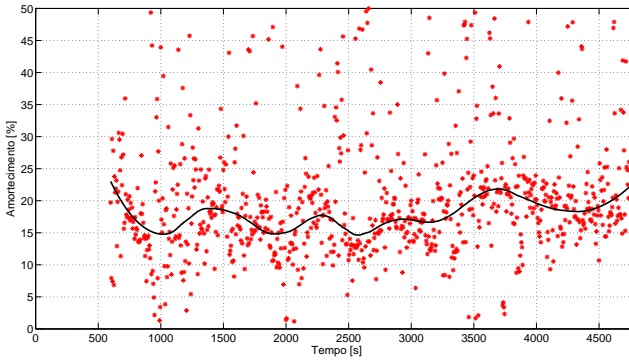
Figura 6.11: Monitoramento do Modo Inter-área - Redespacho e Atuação do CAG.

6.1.5 Análise de Transitórios com a THH e a TTH

Para testar o desempenho da Transformada de Hilbert-Huang (THH) e da Transformada de Teager-Huang (TTH) são realizadas análises



(a) Frequência Modal do Modo Local - Redespacho e Atuação do CAG.



(b) Amortecimento Modal do Modo Local - Redespacho e Atuação do CAG.

Figura 6.12: Monitoramento do Modo Local - Redespacho e Atuação do CAG.

lises usando dados da Janela 1 da Tabela 6.2, onde um curto-circuito trifásico franco é aplicado na barra 7 do sistema teste da Figura 6.1, sem retirada de linhas de transmissão.

O sinal escolhido para análise foi a diferença angular entre as barras 1 e 3 do sistema, e está representado na Figura 6.13(a). Ape-

sar da modelagem de variações aleatórias de carga ter sido levada em consideração, seus efeitos aparentemente não são notados nas excursões angulares. A decomposição modal empírica deste sinal através da EEMD está representada na Figura 6.13(b), onde somente três das principais IMFs que compõem o sinal da Figura 6.13(a) estão representadas. Analisando cada uma das IMFs através da FFT, resulta que a frequência de oscilação da IMF1 é de $0,8 \text{ Hz}$, da IMF2 é de $0,62 \text{ Hz}$ e da IMF3 de $0,47 \text{ Hz}$.

Desta forma, a decomposição modal empírica e a FFT indicam que somente o modo inter-área foi detectado durante a análise desta oscilação. Este fato pode ser justificado, pois como as Transformadas de Hilbert-Huang e a de Teager-Huang só podem ser aplicadas para um sinal de cada vez, para que determinados modos possam ser detectados, é necessário que os mesmos sejam observáveis. No sinal escolhido, o modo observável é o inter-área. Para que os modos locais possam ser observados é necessária a análise de sinais como as diferenças angulares entre as barras 1 e 2 ou entre as barras 3 e 4.

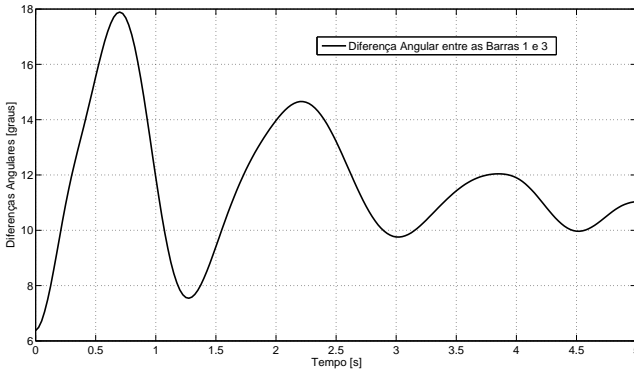
Aplicando-se as Transformadas de Hilbert-Huang e a de Teager-Huang na IMF2, que está associada à oscilação do modo inter-área, obtém-se os valores de amplitude, frequência e amortecimento instantâneos. Estes resultados estão na Figura 6.14(b). As frequências instantâneas indicam que nesta IMF existe uma frequência de oscilação que varia em torno de $0,6 \text{ Hz}$, que está de acordo com os valores obtidos pelos métodos de Prony Multi-sinais e o N4SID e também com o valor da Tabela 6.1.

O cálculo do amortecimento instantâneo, mostrado na Figura 6.14(b), é bastante oscilatório, devido principalmente aos “*end effects*”, comentados na Seção 4.8.4, que têm grande influência em análises de curta duração, ou seja, sistemas bem amortecidos.

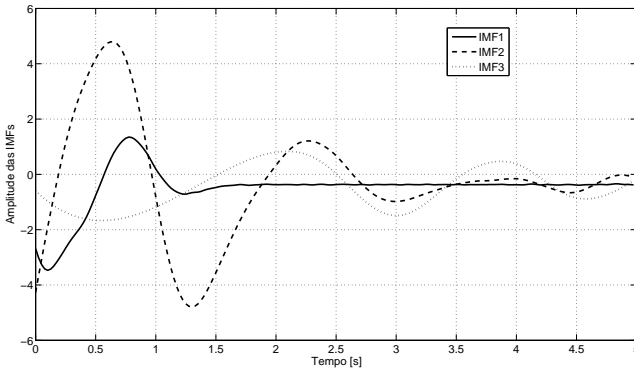
Vale ressaltar que o aumento do tamanho da janela sob análise não tem efeito na melhoria das estimações de amortecimento instantâneo. Os “*end effects*” estão associados ao tempo de duração das respectivas oscilações em cada IMF.

Para ilustrar e associar a influência dos “*end effects*” com o tempo de duração de oscilações quando se usa a THH e a TTH, um sinal que contém modos parecidos com os do sistema teste foi analisado. O sinal é dado por:

$$x(t) = 2\cos(2\pi 0,6t)e^{-0,19t} + 0,5\cos(2\pi 1,35t)e^{-0,25t} \quad (6.1)$$



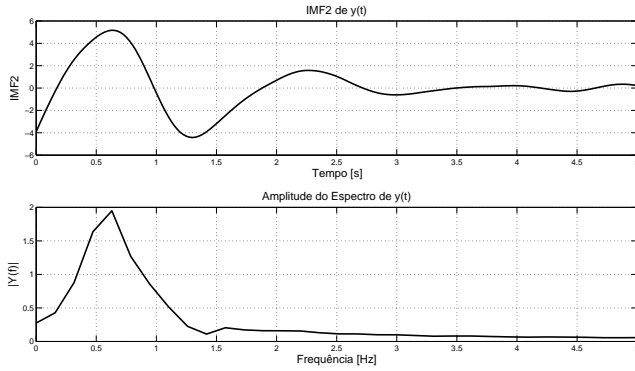
(a) Diferenças Angulares Entre as Barras 1 e 3 do Sistema Teste.



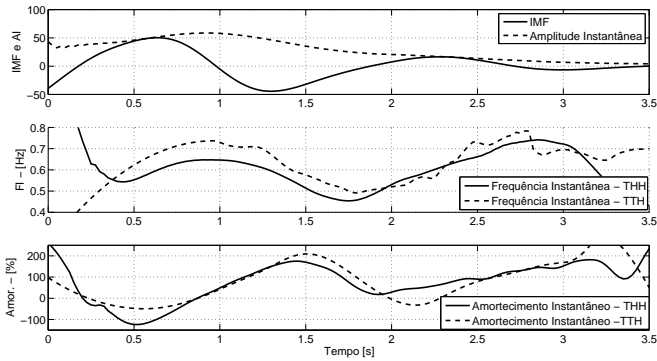
(b) IMFs Obtidas Via EEMD.

Figura 6.13: Decomposição do Sinal em IMFs - EEMD.

Na Figura 6.15(a) supõe-se que a duração da oscilação seja de 5 s e na Figura 6.15(b) a duração seja de 15 s. A influência dos “end effects” nos resultados é clara, principalmente no amortecimento instantâneo. Na Figura 6.15(a), o amortecimento instantâneo oscila entre -100% a quase 200% , já na Figura 6.15(b), em intervalos de tempo de 4 s a 8 s, o amortecimento instantâneo já oscila em torno de 20% , próximo do valor real que é de 19% .



(a) IMF 2 e FFT.

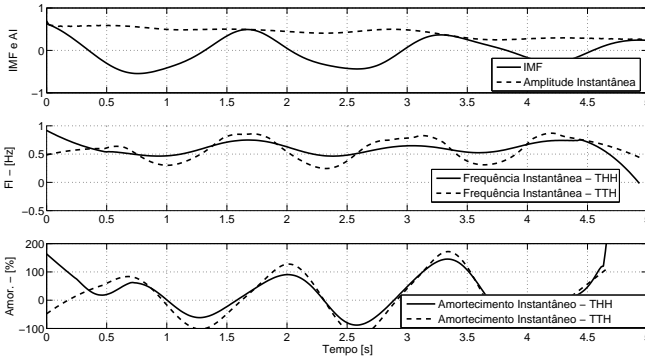


(b) Frequências e Amortecimentos Instantâneos.

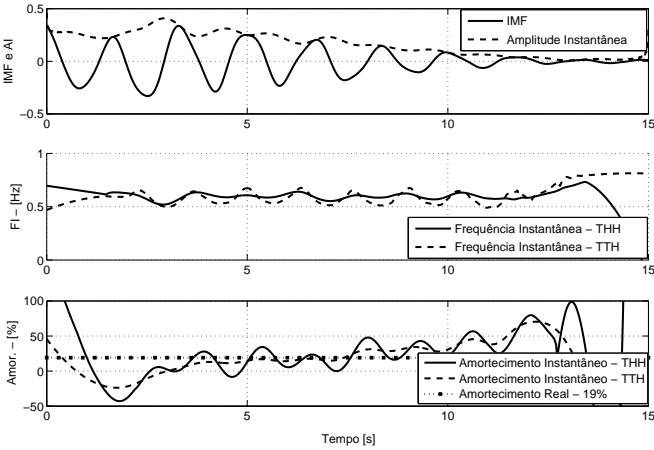
Figura 6.14: Resultado das Análises Usando a THH e a TTH.

6.1.6 Conclusões

O método de Prony multi-sinais e o N4SID foram empregados na análise de dados de simulação a fim de testar seus desempenhos para monitoração de SEP. O desempenho de ambos diante da presença de grandes distúrbios, com e sem a presença de filtros, foi satisfatório e os resultados foram mais exatos para sinais com maior observabilidade modal, sendo que a presença de dados de ambiente influi no desempenho



(a) Janela com 5 s de Duração.



(b) Janela com 15 s de Duração.

Figura 6.15: Resultado do Influência do Tamanho das Janelas Análises da THH e da TTH.

de ambos, degradando as respostas.

Para análises feitas apenas na presença de dados de ambiente, conclui-se que o aumento do tamanho das janelas melhora o desempenho do N4SID. Autovalores com menos energia modal, apesar de serem detectados com o aumento das janelas, apresentaram maior sensibili-

dade e variações para as diferentes janelas analisadas.

O índice de dominância modal calculado para cada autovalor detectado mostrou-se ser uma forma eficiente e sistemática para encontrar quais autovalores têm maior energia e conseqüentemente maior participação em cada sinal analisado. Seu uso torna possível a exclusão de modos espúrios com frequências de oscilação parecidas às que estão nas faixas típicas das de interesse nos SEP, facilitando o processo de monitoração contínua dos principais modos ao longo do tempo. O IDM também é capaz de fornecer informações sobre a ordem que deve ser imposta aos diferentes modelos de identificação usados, evitando seu sobre-dimensionamento.

Em relação às THH e de TTH, os valores de frequência instantânea são bem menos suscetíveis aos “*end effects*” que o amortecimento instantâneo. Assim, estes métodos têm melhores resultados quando existem oscilações de grande duração no sistema ou quando “*end effects*” são reduzidos na Transformada de Hilbert e/ou na EMD. A existência de oscilações por longos períodos em sistemas elétricos de potência tendem a apresentar comportamentos não-lineares e não-estacionários devido às fortes interações dinâmicas que começam a se manifestar de forma mais intensa ao longo do tempo (aumento da amplitude de oscilação). Assim, a THH e a TTH são os métodos mais indicados para análises destes tipos de oscilações ⁸.

6.2 MONITORAMENTO CONTÍNUO DO SIN USANDO DADOS DE AMBIENTE

Nesta seção, a identificação de modos de oscilação em tempo *quase real* é utilizada para a monitoração contínua de modos usando apenas dados de ambiente. O algoritmo de rastreamento automático de modos, proposto e apresentado na Seção 5.4, é testado inicialmente em sistemas lineares com parâmetros variantes (LPV *systems*), onde a frequência e o amortecimento de modos de oscilação podem ser controlados, Seção 5.6.2. Depois de testado em sistemas LPV, o algoritmo é utilizado para rastrear automaticamente os principais modos inter-área do SIN ⁹. Para isto são utilizados dados de uma janela composta

⁸As transformadas Wavelet também podem ser utilizadas para a análise de oscilações não-estacionárias, conforme a Tabela 4.3.

⁹Os resultados apresentados nesta seção foram publicados em [178].

apenas por dados de ambiente, amostrados pelo SMFS de baixa tensão <http://www.medfasee.ufsc.br/temporeal>.

6.2.1 O Sistema Interligado Nacional

O SIN, já apresentado na Figura 3.1, tem uma capacidade instalada de aproximadamente 100 GW, com geração predominantemente hidroelétrica. O sistema de transmissão tem tensões que variam de 230 kV a 765 kV e atende cinco regiões geográficas: Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul. Todas estas regiões estão interligadas, porém existem alguns pequenos sistemas operando de forma isolada na região Norte, que correspondem a aproximadamente 4% da capacidade instalada.

Os modos inter-área do SIN e suas respectivas frequências de oscilação estão apresentados na Tabela 6.13. Estes modos de oscilação são bem amortecidos, mas em algumas condições de operação seus respectivos amortecimentos podem ser reduzidos, como poderá ser visto nesta seção.

Tabela 6.13: Principais Modos Inter-área do Sistema Interligado Nacional.

Modos	Faixa de Frequência
Norte \times Sul	0,20 a 0,40 Hz
Sul \times Sudeste	0,60 a 0,80 Hz
Norte \times Nordeste	0,55 a 0,65 Hz
Mato Grosso \times SIN	0,40 a 0,45 Hz
Rio de Janeiro \times SIN	1,10 a 1,30 Hz
São Paulo \times SIN	0,65 a 0,75 Hz

6.2.2 Rastreamento de Modos de Sistemas LPV

Um sistema teste de ordem 8, cujos autovalores estão apresentados na Tabela 6.14 é usado para testar o algoritmo apresentado na Seção 5.4. O sistema teste possui alguns dos principais modos inter-área do SIN e as variações em seus parâmetros correspondem portanto à variações de modos inter-área. O modo escolhido para ser variado corresponde ao modo Norte-Sul e o resto dos autovalores do sistema não são variados.

Tabela 6.14: Autovalores do Sistema Teste.

Autovalor	Freq. [Hz]	Amor. [%]	Modo Correspondente
$-0,10 \pm 2,25j$	0,36	4,44	$\lambda_{1,2} :=$ Norte-Sul
$-0,64 \pm 3,85j$	0,61	16,4	$\lambda_{3,4} :=$ Sul-Sudeste
$-0,72 \pm 4,71j$	0,75	15,1	São Paulo contra o SIN
$-0,0262 \pm 0,126j$	0,02	20,4	Modo de Controle de Frequência do SIN

Os parâmetros variantes $\theta_i(t)$, definidos na Seção 5.6.2, do modo Norte-Sul são ajustados e controlados de forma a gerar dois sistemas LPV distintos, LPV1 e LPV2. Para ambos sistemas um sinal de pequena amplitude é usado para modular o modo com frequência de oscilação de 0,36 Hz, variando o parâmetro $\theta_{2_1}(t)$ de forma que $\theta_{2_1}(t) = 0,1 \sin(0,003t)$, como pode ser visto na linha tracejada azul da Figura 6.17 e da Figura 6.19.

O amortecimento modal também é modulado, porém de duas formas diferentes. Para o LPV1, $\theta_{1_1}(t)$ é variado a fim de produzir uma variação modal com formato de uma curva *Gaussiana*, como mostrado pela linha tracejada azul da Figura 6.18. No LPV2, o amortecimento modal é variado de forma abrupta, de acordo com as retas mostradas pela linha tracejada azul da Figura 6.20.

Para o LPV1, os sinais utilizados no processo de rastreamento modal estão mostrados na Figura 6.16, onde as legendas com nomes de *sada_i* representam sinais do sistema LPV1. As reduções de amplitude dos sinais de saída, mostradas na Figura 6.16, são devido ao padrão *Gaussiano* da variação do amortecimento modal, mostrado pela linha tracejada azul na Figura 6.18.

A fim de testar o algoritmo *proposto* para realizar a monitoração contínua de modos de forma automática, diversas janelas deslizantes de 10 minutos são utilizadas. A atualização das janelas é feita regularmente a cada intervalo de 5 s, usando um modelo para o N4SID de ordem 30. Os primeiros resultados aparecem apenas depois os primeiros 600 s de análise. Um método de mínimos quadrados é usado para ajustar o conjunto de pontos.

Os resultados da aplicação do método automático de detecção de modos nos dois sistemas LPV, mostram que o algoritmo é capaz de rastrear as variações moduladas de frequência com boa precisão, como mostrado nas Figuras 6.17 e 6.19.

Para o sistema LPV1, que apresenta variação do amortecimento com formato *Gaussiano*, o algoritmo de rastreamento automático de modos apresenta um desempenho melhor se comparado ao sistema com variações modais abruptas, pois consegue rastrear o amortecimento mo-

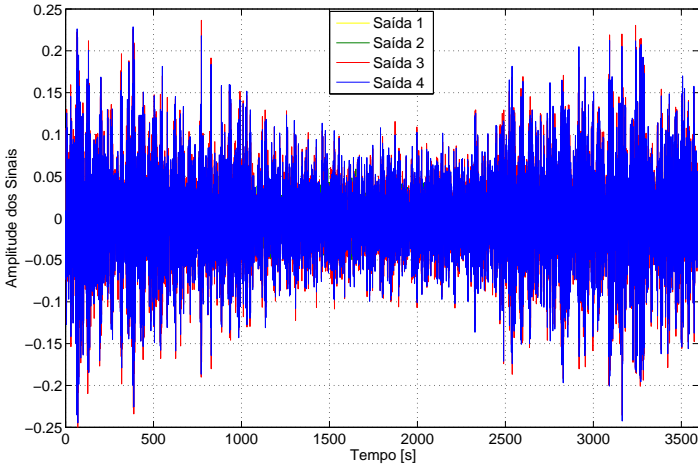


Figura 6.16: Sinais Analisados - Sistema LPV1.

dal com menos atraso. Estes resultados podem ser vistos na Figura 6.18 e na Figura 6.20, respectivamente.

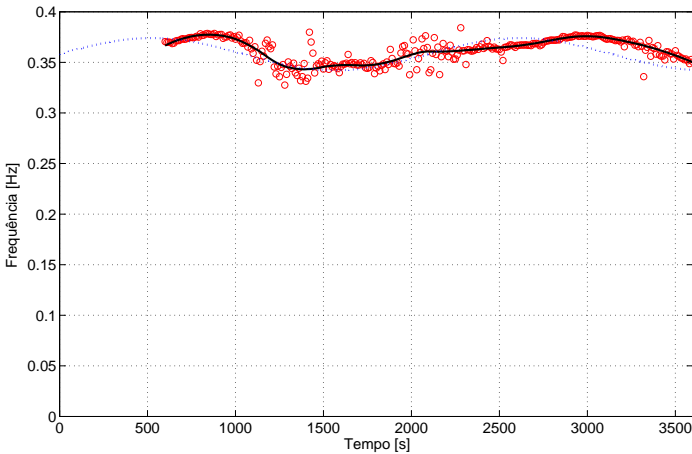


Figura 6.17: Frequência Modal - LPV1, ($\lambda_{1,2}$).

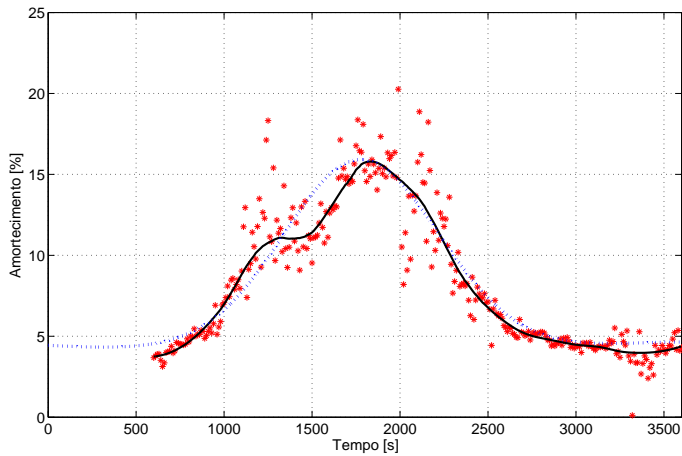


Figura 6.18: Amortecimento Modal - LPV1, $(\lambda_{1,2})$.

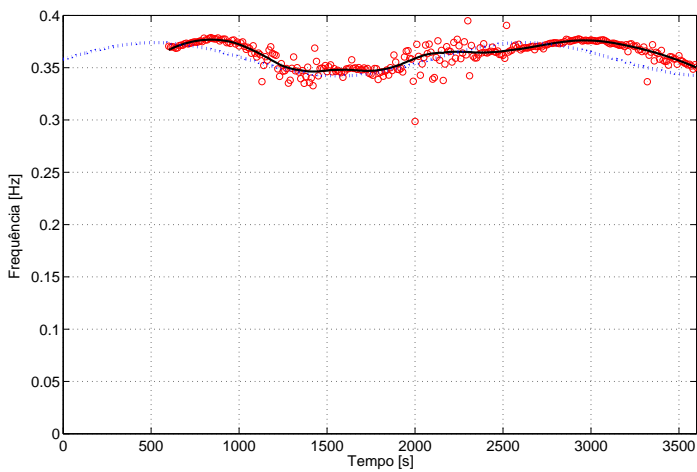


Figura 6.19: Frequência Modal - LPV2, $(\lambda_{1,2})$.

O desempenho do algoritmo de rastreamento automático de modos também é testado para rastrear modos que foram mantidos constantes no sistema LPV. O modo escolhido foi o com frequência de 0,61 Hz na Tabela 6.14. Apenas o pior caso, que corresponde ao LPV2, onde mudanças abruptas foram consideradas é mostrado. Os resultados do rastreamento da frequência e do amortecimento modal são mostrados na Figura 6.21 e na Figura 6.22, respectivamente. Os valores de frequência e amortecimento estão espalhados em torno dos valores reais. Estas grandes variâncias no processo de detecção podem ser explicadas pela baixa energia modal associada a este modo em particular, que também apresenta amortecimento elevado ($\approx 16\%$)¹⁰.

Resultados melhores para o processo de rastreamento modal, se comparados aos obtidos para o modo constante com frequência de 0,61 Hz, foram obtidos para o sistema LPV1, porém não são apresentados nesta tese.

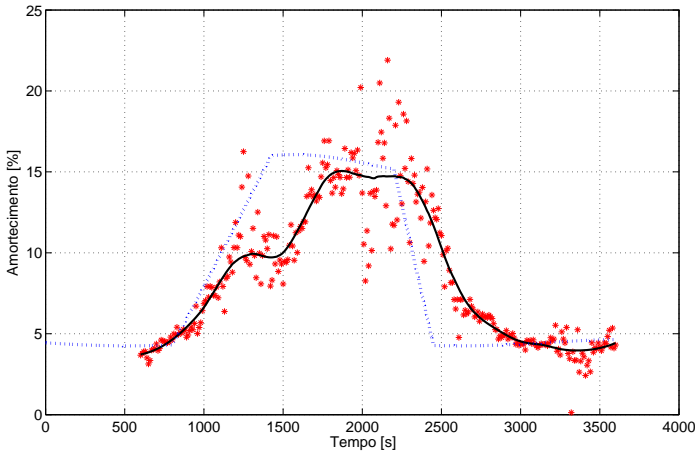


Figura 6.20: Amortecimento Modal - LPV2, ($\lambda_{1,2}$).

Outros testes foram realizados com intuito de analisar a influência do tamanho das janelas no desempenho de rastreamento automático. Reduzindo a janela de 600 s para 400 s ou 300 s melhora a aderência no rastreamento dos modos variantes, mostrados nas figuras 6.19

¹⁰Quanto maior o amortecimento, menor a energia modal.

e 6.20. No entanto, este procedimento aumenta a dispersão para os modos restantes do sistema que foram mantidos constantes. Aumentar o tamanho da janela (> 600 s) pode transformar o processo de monitoração contínua em tempo quase real muito demorado. Porém, isto poderia ser contornado aumentando o período de atualização das respostas para intervalos maiores que os atuais 5 s ¹¹.

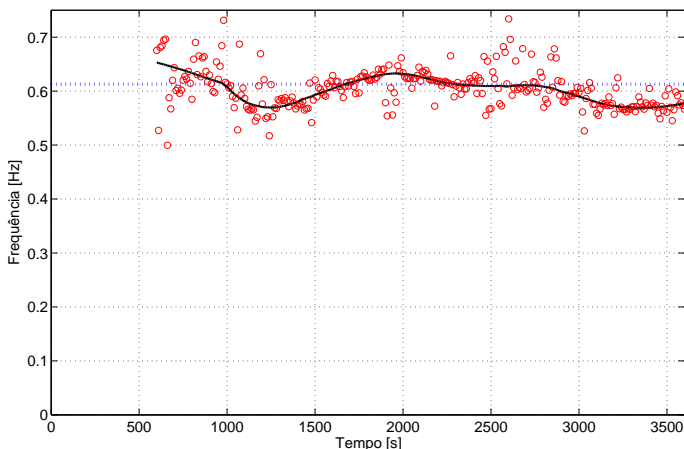


Figura 6.21: Frequência Modal do Modo de 0,61Hz - LPV2, ($\lambda_{3,4}$).

6.2.3 Monitoramento Automático de Modos Eletromecânicos do SIN

A detecção dos modos de oscilação inter-área do SIN possibilita o monitoramento de seus respectivos amortecimentos de acordo com as mudanças no ponto de operação do sistema.

As análises feitas nesta seção consideram janelas de dados compostas apenas por dados de ambiente, amostradas no dia 22 de Outubro de 2010 no intervalo de tempo das 16h00min às 18h00min, intervalo onde normalmente há aumento de carga e geração.

A frequência do sistema para esta condição normal de operação é

¹¹A escolha do tamanho da janela de dados é um problema de difícil solução, pois depende dos tipos das oscilações presentes nos sinais.

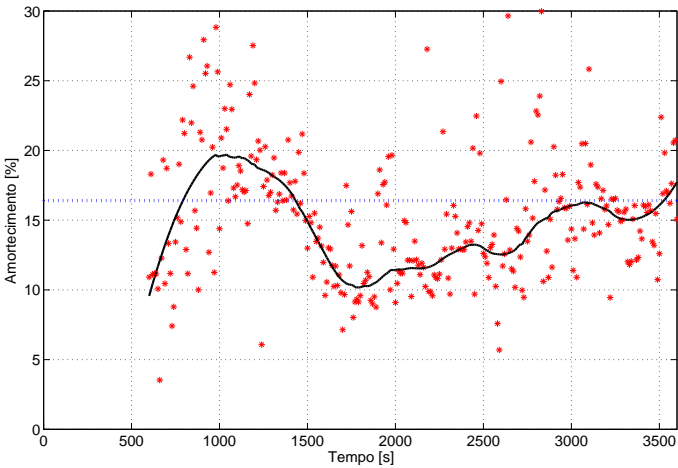


Figura 6.22: Amortecimento Modal de 16,4% - LPV2, ($\lambda_{3,4}$).

mostrada na Figura 6.23, onde sinais da região Norte (N), Sudeste(SE) e Sul(S) são apresentados.

Os sinais utilizados para monitoração são frequências medidas pelo SMFS localizado na baixa tensão, instalados nas seguintes universidades: UFPA(N1), UNIFEI (SE2) e UFSC (S2), como mostrado na Figura 3.1, e também suas diferenças angulares. Os modos inter-área mais observáveis presentes nestes sinais são o Norte-Sul e o Sul-Sudeste. As faixas de frequência destes modos podem ser encontradas na Tabela 6.13.

Duas Janelas, mostradas na Tabela 6.15, foram selecionadas. Na Janela 1, o algoritmo proposto (ASRAM) é aplicado para detectar os modos Norte-Sul e o Sul-Sudeste e suas respectivas energias modais, quantificadas pelo IDM da Seção 5.3. Na Janela 2, duas horas de dados, compostos apenas por dados de ambiente, são utilizados pelo algoritmo para rastrear os referidos modos automaticamente em tempo quase real.

Tabela 6.15: Identificação das janelas.

Janela	Tempo [s]
1	0 to 600
2	0 to 7200

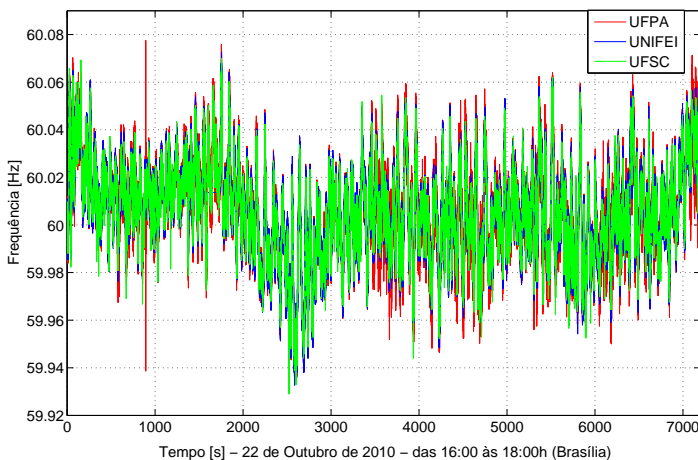


Figura 6.23: Frequência do SIN.

Análise da Janela 1 - O Uso do IDM

As análises feitas nesta seção têm o intuito de mostrar a eficácia de ordenação de autovalores através do uso do IDM de acordo com suas respectivas energias modais.

Os modos eletromecânicos dominantes obtidos pelo uso do IDM estão mostrados na Tabela 6.16. Para a detecção do primeiro conjunto de autovalores, as diferenças angulares UFPA(N1)-UFSC(S2) e UNIFEI(SE2)-UFSC(S2) foram usadas simultaneamente. Para o segundo e terceiro conjuntos de autovalores, os sinais de frequência da UFPA(N1) e da UFSC(S2) e na UNIFEI(SE2) e na UFSC(S2) foram usados, respectivamente.

Embora modos eletromecânicos tenham sido encontrados, resta ainda associar tais modos aos principais modos eletromecânicos inter-área do SIN mostrados na Tabela 6.13. Se o IDM é usado para diferença angular entre medições feitas na região Norte e na Sul, é de se esperar que o modos Norte-Sul apresentará alta energia modal. Se o IDM é usado para a diferença angular UNIFEI(SE2)-UFSC(S2), é esperado que o modo Sul-Sudeste apresentará alta energia modal. Estes resultados estão mostrados na Tabela 6.17 e na Tabela 6.18, onde um IDM Relativo (R_{IDM}) é usado para mostrar a energia modal relativa entre os

Tabela 6.16: Identificação dos Modos Dominantes e Dominância Modal Relativa. Janela 1

$\Delta\theta$: UFPA(N1)-UFSC(S2) & UNIFEI(SE2)-UFSC(S2)			
Ordem	Autovalor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
30	$-0,337 \pm 2,328j$	14,33	0,37
30	$-0,641 \pm 3,818j$	16,55	0,61
Δf : UFPA(N1) & UFSC(S2)			
Ordem	Autovalor	Amortecimento [%]	Frequência [Hz]
30	$-0,215 \pm 2,386j$	8,96	0,38
30	$-0,887 \pm 3,787j$	22,84	0,60
Δf : UNIFEI(SE2) & UFSC(S2)			
30	$-0,148 \pm 2,385j$	6,18	0,38
30	$-0,616 \pm 3,934j$	15,46	0,63

modos Norte-Sul e Sul-Sudeste para cada sinal.

Tabela 6.17: Dominância Modal Relativa para Diferenças Angulares UFPA(N1)-UFSC(S2) & UNIFEI(SE2)-UFSC(S2). Janela 1

$\Delta\theta$: UFPA(N1)-UFSC(S2) & UNIFEI(SE2)-UFSC(S2)			
UFPA(N1)-UFSC(S2)		UNIFEI(SE2)-UFSC(S2)	
Autovalor	R_{IDM} (pu)	Autovalor	R_{IDM} (pu)
$-0,337 \pm 2,328j$	4,87	$-0,641 \pm 3,818j$	14,15
$-0,641 \pm 3,818j$	1,00	$-0,337 \pm 2,328j$	1,00

Tabela 6.18: Dominância Modal Relativa para Frequências UFPA(N1) & UFSC(S2) e UNIFEI(SE2) & UFSC(S2). Janela 1

Δf : UFPA(N1) & UFSC(S2)			
UFPA(N1)		UFSC(S2)	
Autovalor	R_{IDM} (pu)	Autovalor	R_{IDM} (pu)
$-0,215 \pm 2,386j$	20,00	$-0,887 \pm 3,787j$	2,53
$-0,887 \pm 3,787j$	1,00	$-0,215 \pm 2,386j$	1,00
Δf : UNIFEI(SE2) & UFSC(S2)			
UNIFEI(SE2)		UFSC(S2)	
Autovalor	R_{IDM} (pu)	Autovalor	R_{IDM} (pu)
$-0,616 \pm 3,934j$	1,01	$-0,616 \pm 3,934j$	28,28
$-0,148 \pm 2,385j$	1,00	$-0,148 \pm 2,385j$	1,00

O R_{IDM} para as diferenças angulares UFPA(N1)-UFSC(S2) e UNIFEI(SE2)-UFSC(S2) estão apresentados na Tabela 6.17. Estes resultados confirmam que o IDM é eficaz em associar os autovalores identificados aos modos de oscilação do sistema através da ordenação modal usando as suas respectivas energias.

Para a diferença angular UFPA(N1)-UFSC(S2), o modo Norte-Sul, detectado na faixa de 0,20 a 0,40 Hz, tem um IDM maior ($R_{MDI} = 4,87$) se comparado ao modo Sul-Sudeste, na faixa de 0,60 a 0,80 Hz. Quando o sinal é a diferença angular UNIFEI(SE1)-UFSC(S2), o IDM indica que a energia do modo Sul-Sudeste prevalece diante da energia do modo Norte-Sul ($R_{MDI} = 14,15$). Resultados análogos podem também

ser encontrados na Tabela 6.18 para os sinais de frequência indicados.

Na Tabela 6.18, o R_{MDI} para o sinal de frequência medido na UNIFEI(SE1) indica que os modos Norte-Sul e Sul-Sudeste têm energias modais similares quando medidos no referido ponto ¹².

Análise da Janela 2 - Rastreamento Modal

A janela de tempo 2, mostrada na Tabela 6.15, foi a escolhida para monitoração, pois durante este intervalo de tempo tanto o carregamento como os principais fluxos de potência entre regiões começam a aumentar até atingir uma condição de carregamento elevado. Isto ocorre por volta das 18h00min, horário de Brasília.

A fim de aplicar o método proposto para rastreamento modal automático, diversas janelas deslizantes de 10 minutos são analisadas e os resultados são atualizados regularmente a cada intervalo de 5 s.

Os resultados da aplicação do algoritmo proposto (ASRAM) quando aplicados à Janela 2 para rastrear o modo Norte-Sul de forma automática ¹³ estão apresentados na Figura 6.24 e na Figura 6.25, onde frequência e amortecimento modais associados ao modo Norte-Sul são mostrados, respectivamente.

A frequência modal do modo Norte-Sul varia lentamente com o tempo de forma quase contínua. Por outro lado, o amortecimento modal do modo Norte-Sul sofre uma redução significativa, iniciada em torno de 2000 s. Esta redução pode ser explicada pelo grande aumento no fluxo entre as áreas Norte(N)-Sudeste(SE) e Norte(N)-Sul(S), confirmado pelo aumento da diferença angular mostrado na Figura 6.26, que também se inicia em torno de 2000 s. Existe uma forte correlação entre amortecimento e fluxo de potência na interligação Norte-Sul, que é composta por diversas linhas de transmissão em 500 kV, conectando a região norte à região sudeste.

O algoritmo *proposto* para rastreamento modal (ASRAM) pôde rastrear o modo Norte-Sul com pequenas dispersões nas estimativas de frequência, mesmo em uma situação com variação modal lenta. O amortecimento do modo Norte-Sul também foi rastreado, porém com maiores dispersões na detecção, principalmente em torno de 1500 s e 5000 s. Nestes instantes também foram observadas as maiores variações

¹²Devido à localização geo-elétrica do ponto de medição no SIN.

¹³Não supervisionada por operadores.

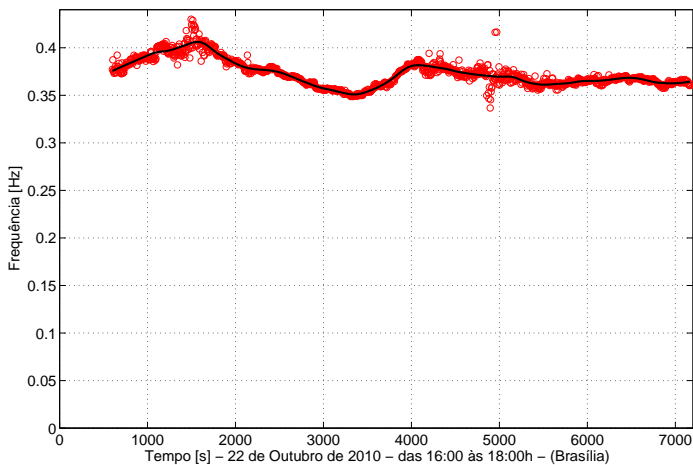


Figura 6.24: Frequência Modal - Modo Norte-Sul.

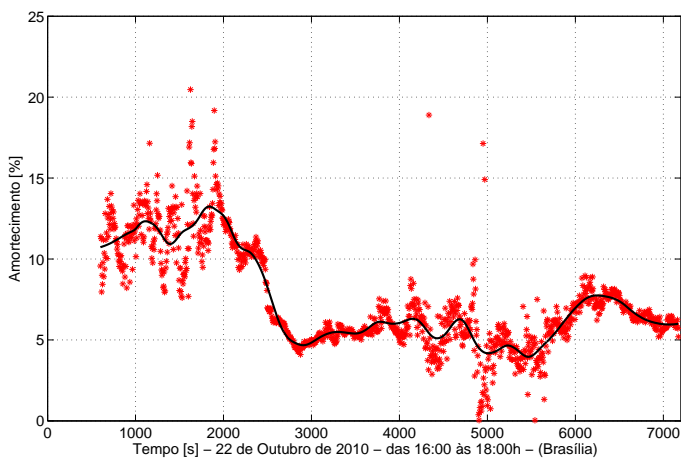


Figura 6.25: Amortecimento Modal - Modo Norte-Sul.

no rastreamento da frequência de oscilação do modo Norte-Sul.

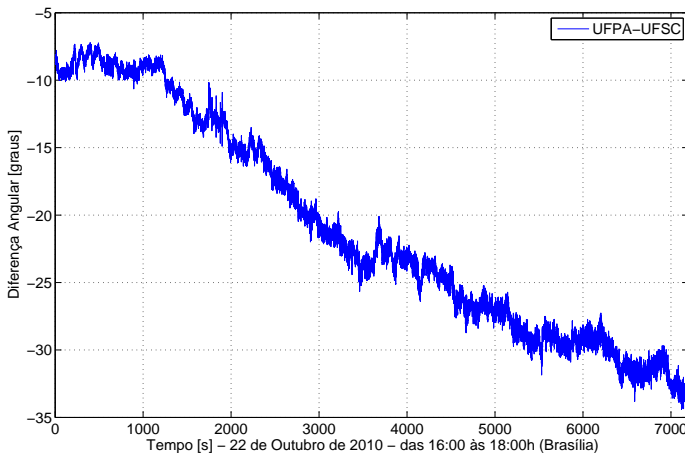


Figura 6.26: Diferença Angular - Norte-Sul.

O rastreamento do modo Sul-Sudeste, que tem energia modal menor que a do modo Norte-Sul, é apresentado nas figuras 6.27 e 6.28. Resultados semelhantes, se comparados às análises do rastreamento do modo Norte-Sul, foram obtidos para este caso. No entanto, uma maior dispersão modal foi verificada para o amortecimento, como mostrado na Figura 6.28.

Análises das Dispersões Modais

Diversos testes, incluindo outras situações não consideradas neste documento, mostraram que as dispersões no processo de rastreamento de frequência e amortecimentos modais pode ser reduzida com uma escolha conveniente de sinais. Embora análises simultâneas de diversos sinais em métodos de subespaço como o N4SID tendam a aumentar a robustez do processo de identificação, a associação de sinais que apresentem elevada energia para diferentes modos pode aumentar a dispersão. Por exemplo, o rastreamento do modo Sul-Sudeste tende a ter menor dispersão quando se usam na identificação somente sinais destas duas regiões, tais como sinais de frequência locais ou diferenças

angulares entre pontos que pertençam a estas duas regiões ¹⁴.

Uma causa possível da grande dispersão das estimativas pode estar associada a chaveamentos e até mesmo mudanças significativas em fluxos entre áreas. No entanto, informações detalhadas para o período considerado não foram disponibilizadas pelo ONS.

Um exemplo de como a escolha de sinais pode influenciar no rastreamento dos modos Norte-Sul e Sul-Sudeste foi dado nas figuras 6.25 e 6.28. Na Figura 6.25 existe uma dispersão modal significativa até aproximadamente 2000 s, o que não ocorre na Figura 6.28. Apesar de o modo Sul-Sudeste possuir energia modal inferior ao Norte-Sul ¹⁵, a dispersão até o instante 2000 s é menor, o que dá indícios de que o que esta causando as dispersões até os 2000 s são eventos na região Norte. Caso fossem utilizados sinais da região Norte no processo de rastreamento do modo Sul-Sudeste, as dispersões aumentariam até o instante 2000 s na Figura 6.28.

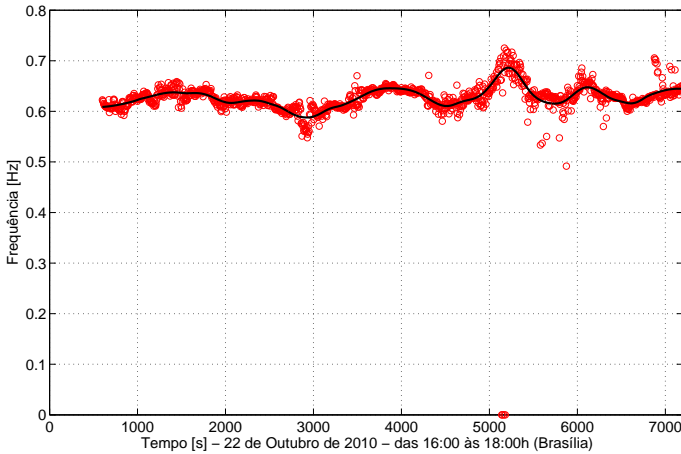


Figura 6.27: Frequência Modal - Modo Sul-Sudeste.

¹⁴Sinais de frequência e diferenças angulares destas regiões podem ser usados simultaneamente.

¹⁵O amortecimento do modo Sul-Sudeste é maior que o do Norte-Sul, logo a dispersão no modo Sul-Sudeste tende a ser maior.

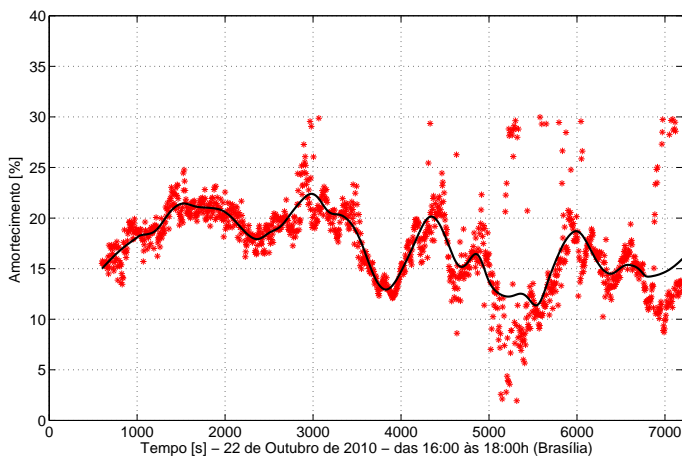


Figura 6.28: Amortecimento Modal - Modo Sul-Sudeste.

6.2.4 Conclusões

O monitoramento de oscilações eletromecânicas usando dados de SMFS pode aumentar a segurança operativa de sistemas elétricos de potência, além de permitir que a avaliação de desempenho e robustez de controladores seja feita. O desempenho de controladores pode ser avaliado através do monitoramento do amortecimento de modos inter-área de acordo com mudanças no carregamento, fluxos de intercâmbio entre áreas e também mudanças topológicas no sistema.

O rastreamento de modos em tempo *quase real* é uma tarefa difícil de ser realizada com exatidão, devido aos sistemas elétricos de potência possuírem comportamento estocástico, não-estacionário e não-linear, havendo carência de desenvolvimento de novas metodologias capazes de detectar modos com maior exatidão.

O algoritmo proposto para rastrear modos automaticamente (ASRAM) apresentou bons resultados no rastreamento de modos de sistemas LPV, onde frequências e amortecimentos modais podem ser variados de acordo com regras pré-estabelecidas. O IDM tem papel importante no processo automático de rastreamento modal, pois utiliza os próprios dados fornecidos pelos métodos de identificação para selecionar os modos desejados.

O método foi aplicado para monitoramento de modos inter-área do SIN usando dados reais do SMFS da baixa tensão. Os resultados dos rastreamentos de amortecimentos modais foram consistentes com as variações nos pontos de operação do SIN, ocasionados por mudanças de fluxo entre áreas.

Diversos fatores têm influência no desempenho do algoritmo proposto, tais como a energia modal, tamanho de janelas, e a natureza das oscilações. Apesar de métodos de subespaço de espaço de estados serem capazes de analisar diversos sinais simultaneamente, fato que aumenta a robustez das respostas, dispersões surgem durante o processo de rastreamento. As dispersões modais podem ser reduzidas com a escolha adequada de sinais.

6.3 BLACKOUT DE FEVEREIRO DE 2011 NA REGIÃO NORDESTE

Nesta seção a monitoração contínua do modo inter-área Norte-Sul será efetuada de acordo com o conjunto de algoritmos descritos na Seção 5.4, utilizando dados amostrados pelo Sistema de Medição Fasorial Sincronizada localizado na Baixa Tensão, Seção 3.2. A monitoração do modo Norte-Sul tem início às 23h20min do dia 03/02/2011 e termina às 03h00min do dia 04/02/2011, o que possibilita a visualização das variações do modo Norte-Sul perante diversas condições operativas e estruturais do sistema. O intervalo de tempo de monitoração abrange desde alguns minutos antes do início do *blackout*, passa pelo período onde se inicia o processo de recomposição do sistema, composto por chaveamentos, ressincronizações de máquinas, tomadas de carga e a ocorrência de novos desligamentos.

6.3.1 Descrição do *Blackout* no Nordeste

No dia 4 de Fevereiro de 2011 ocorreu uma perturbação com origem na Subestação 500 kV de Usina Hidroelétrica (UHE) Luiz Gonzaga da CHESF, que envolveu as interligações Sudeste-Nordeste (SE-NE), Norte-Nordeste (N-NE) e provocou os desligamentos das mesmas. A sequência de eventos isolou grande parte do sistema Nordeste do restante do Sistema Interligado Nacional (SIN), culminando com o colapso

no abastecimento das cargas da região Nordeste, exceto os estados do Piauí e Maranhão e parte do Sudoeste da Bahia. Neste momento a carga total do sistema Nordeste era de 8884 MW, o que equivale a uma condição de carga média.

A perturbação teve início às 00h08min, com os desligamentos automáticos da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga Circuito 1 (C1) e da Barra 1 de 500 kV da Subestação Luiz Gonzaga, devido à atuação accidental da proteção de falha de disjuntor. Com isso, as Unidades Geradoras (UG) 3 e 4 da UHE Luiz Gonzaga permaneceram conectadas radialmente à Linha de Transmissão (LT) 500 kV Luiz Gonzaga/Paulo Afonso IV. No instante destes desligamentos a LT 500 kV São João do Piauí/Milagres se encontrava fora de operação desde o dia anterior (03/02/2011) para manutenção. Esses desligamentos forçados não acarretaram desligamentos de carga no SIN, porém serviram de início para uma sequência de eventos que culminaram com o *blackout* no subsistema Nordeste.

Na Figura 6.29, estão as variações de frequência das regiões norte (UFPA) e sudeste (USP São Carlos), dados usados na identificação, para o intervalo entre 00h00min e 03h00min, onde estão indicadas as ocorrências 1 e 2, descritas a seguir.

Em seguida às 00h21min (Ocorrência 1), na tentativa de religamento da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C1, no terminal de Luiz Gonzaga, ocorreu o desligamento automático do barramento de 500 kV dessa Subestação (SE), provocado pela atuação accidental da proteção de falha de disjuntor da referida LT 500 kV. Esta atuação ocasionou a abertura de todos os disjuntores conectados a uma das barras de 500 kV da subestação e conseqüentemente das LTs 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2 e Luiz Gonzaga/Milagres. Com isso, as unidades geradoras da UHE Luiz Gonzaga, permaneceram conectadas radialmente.

Estes desligamentos provocaram oscilações de potência do sistema Nordeste em relação aos subsistemas Norte e Sudeste/Centro-Oeste, o que levou à atuação das Proteções de Perda de Sincronismo (PPS) das interligações N-NE e SE-NE, ocasionando os desligamentos automáticos das seguintes linhas de transmissão:

- LTs 500 kV Teresina II / Sobral III C1 e C2 (N-NE);
- LT 500 kV Rio das Águas / Bom Jesus da Lapa (SE-NE).

e culminou com a perda de sincronismo entre o subsistema Nordeste e

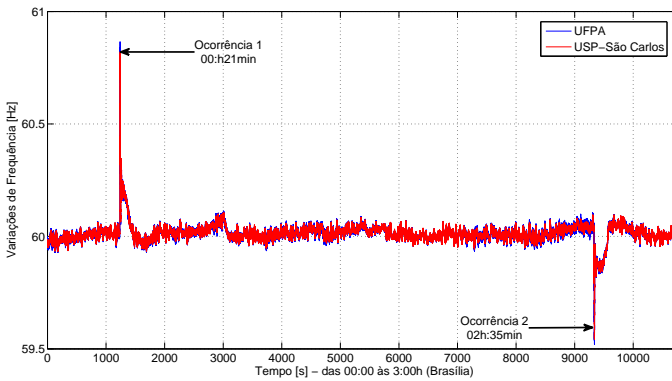


Figura 6.29: Variações de Frequência no SIN Durante Ocorrências - Regiões Norte e Sudeste.

os subsistemas Norte e Sudeste/Centro-Oeste.

Os desligamentos das linhas acima resultaram no isolamento do sistema Nordeste do restante do SIN, com exceção dos estados do Piauí e Maranhão e parte do Sudoeste da Bahia, provocando déficit elevado de geração neste sistema, em função do cenário Nordeste importador, que recebia 3237 MW no instante da perturbação.

Devido ao déficit de geração no subsistema ilhado da região Nordeste ocorreu subfrequência, com valor mínimo de 56,44 Hz, com consequente correta atuação dos cinco estágios do Esquema Regional de Alívio de Carga (ERAC) desta região, interrompendo 3297 MW de cargas (41,21% do total).

A área Norte da região Nordeste ficou suprida apenas por LTs de 230 kV o que ocasionou colapso de tensão e um corte adicional de cargas pela atuação do Sistema Especial de Proteção (SEP) por subtensão e, também, por rejeição natural. Devido aos cortes de carga, ocorreram sobretensões e diversos equipamentos de controle de reativos foram desligados, juntamente com algumas LTs 500 kV e 230 kV da região.

Decorridos aproximadamente 40 segundos, ocorreram os desligamentos automáticos de 5 unidades geradoras na UHE Xingó (1768 MW) e após cerca de mais 10 segundos de 3 unidades na UHE Paulo Afonso IV (812 MW), permanecendo apenas uma unidade geradora em cada uma dessas usinas. Após cerca de 1 a 2 minutos, ocorreram também

desligamentos de uma unidade geradora em cada uma das UHEs de Paulo Afonso I, Paulo Afonso III e Apolônio Sales, totalizando nessas três usinas 193 MW. Em função destes desligamentos, ocorreu sub-tensão e subfrequência no sistema ilhado, ocasionando a atuação do Sistema Especial de Proteção (SEP) de sub-tensão das áreas Leste e Sul da região Nordeste e rejeição natural de carga.

Após esses eventos, o sistema ilhado da região Nordeste permaneceu energizado com níveis de tensão e frequência degradados por aproximadamente 7 minutos, até às 00h29min, momento em que ocorreu o *colapso total* desse sistema, com desligamento total das cargas remanescentes, de cerca de 2316 MW.

O processo de recomposição do sistema se iniciou às 00h32min, sendo que o Operador Nacional do Sistema (ONS) teve que estabelecer nova estratégia de recomposição, devido a problemas de sincronização na UHE Xingó. Mais tarde, ainda durante o processo de recomposição, às 02h35min (ocorrência 2) ocorreu sobre-fluxo na LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2 devido ao elevado nível de geração da UHE Xingó sem que houvesse uma tomada de carga adequada, o que ocasionou na atuação da proteção de distância e retirada da referida LT. Também às 02h:36min, foram desligadas a UG3 e a UG4 de Xingó e entre 02h36min e 02h37min foram desligadas 4 UG da UHE Luiz Gonzaga, separando as subregiões Sul e Leste da Região Nordeste do SIN. O processo de recomposição se prolongou até por volta das 04h30min.

Permaneceram supridos pelo SIN o estado do Piauí, a parte da região Sudoeste do estado da Bahia, bem como as cargas do estado do Maranhão.

Os resultados da monitoração contínua do modo Norte-Sul assim como análises pontuais nos períodos onde ocorrem grandes distúrbios são apresentados a seguir.

6.3.2 Monitoramento do Modo Norte-Sul

O modo inter-área Norte-Sul foi monitorado durante o período das 23h30min do dia 03/02/2011 até às 03h00min do dia 04/02/2011. Para isto, este intervalo de tempo foi dividido em 4 Janelas de tempo, apresentadas na Tabela 6.19

O primeiro intervalo de tempo (Janela 0) corresponde ao intervalo de tempo anterior às ocorrências. As frequências medidas na baixa

Tabela 6.19: Identificação das Janelas - *Blackout* no Nordeste.

Janela	Intervalo [s]
0	23h30min às 00h10min
1	00h10min à 01h00min
2	01h00min às 01h50min
3	01h50min à 03h00min

tensão na UFPA e na USP São Carlos são os sinais usados para o monitoramento contínuo do modo Norte-Sul. Estes dados são utilizados no ASRAM para efetuar a monitoração contínua não assistida de modos eletromecânicos, utilizando o N4SID em conjunto com o IDM, como *proposto* nas Seções 5.3 e 5.4.

Na Figura 6.30(a) estão os valores de variações de frequência do SIN, e nas Figuras 6.30(b) e 6.30(c) os valores de frequência e amortecimento modal detectados, respectivamente, do modo Norte-Sul. Nota-se que a frequência modal foi rastreada sem a presença de grandes dispersões, porém as dispersões são intensificadas para o amortecimento modal, apresentado na Figura 6.30(c).

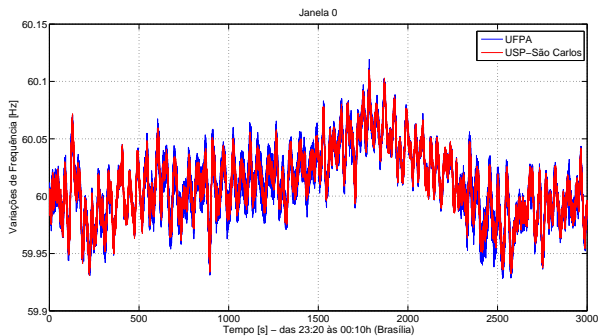
Ao se fazer a monitoração do modo Norte-Sul utilizando as variações de frequência apresentadas na Figura 6.31(a), na Janela 1, pode-se notar que quando há a separação do subsistema Nordeste do SIN (início do *blackout* na região Nordeste) o algoritmo *proposto* detecta mudanças *repentinas* na frequência e no amortecimento modal. Os instantes destas mudanças foram ilustrados por linhas tracejadas na Figura 6.31(b) e na Figura 6.31(c), pois as interpolações pelo método dos mínimos quadrados não mostram isto.

Com a separação do subsistema do Nordeste do SIN, a frequência de oscilação do modo Norte-Sul se reduz de 0,47 Hz para 0,40 Hz (Figura 6.31(b)), já o amortecimento aumenta repentinamente de valores inferiores a 5% para valores em torno de 11%, Figura 6.31(c).

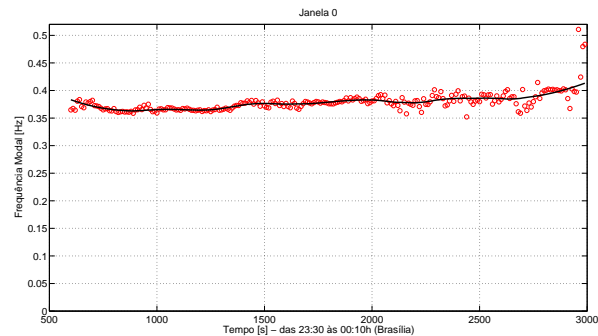
Observando a evolução do amortecimento do modo Norte-Sul, Figura 6.30(c) e Figura 6.31(c) nota-se que a partir das perturbações iniciais, às 00:h08min, o amortecimento começa a se deteriorar, passando de valores em torno de 20% para valores abaixo de 5% ¹⁶.

Na Janela 1 o processo de recomposição já foi iniciado e vários chaveamentos ocorreram [188]. Pode se notar que as dispersões tanto para a frequência quanto para o amortecimento modal se acentuam

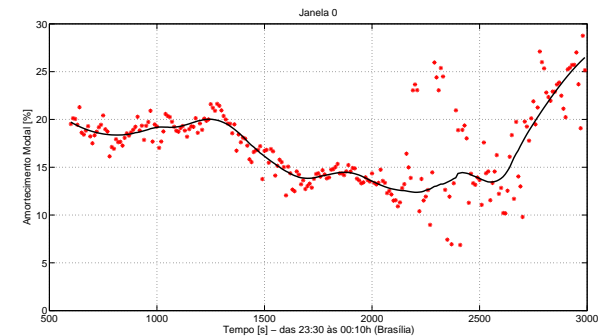
¹⁶No relatório [188] não há relatos de ocorrências para o instante onde o amortecimento diminui subitamente de valores em torno de 8% para valores em torno de 3%.



(a) Variações de Frequência no SIN - Regiões Norte e Sudeste.



(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(c) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

Figura 6.30: Monitoramento do Modo Norte-Sul - Pré-ocorrência.

entre os intervalos de 2700 s e 3200 s nas Figuras 6.31(b) e 6.31(c).

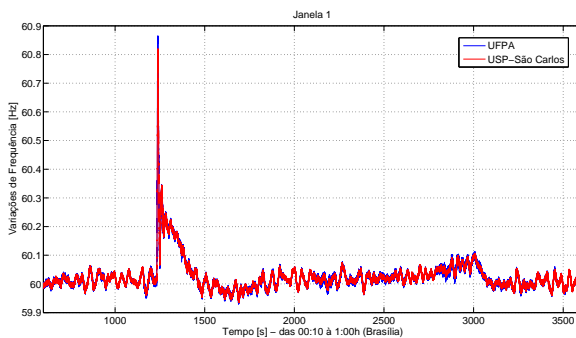
Os resultados para a monitoração do modo Norte-Sul durante a Janela 2 (da 01h00 à 01h50min) podem ser encontrados nas Figuras 6.32(b) e 6.32(c). O amortecimento do modo Norte-Sul diminui de valores acima de 10% para valores em torno de 5%. Nesta janela, diversas linhas de transmissão que fazem parte do sistema de interligação Norte-Nordeste já haviam sido restabelecidas. A interligação Sudeste-Nordeste também foi normalizada nesta janela [188].

Através da Figura 6.33, que ilustra a tomada de carga na região Nordeste, pode-se ter uma noção de como foi a evolução do processo de recomposição do sistema. Durante a Janela 3, da 01h50min às 03h00min a tomada de carga na região Nordeste pode ter sido a causa do baixo amortecimento do modo Norte-Sul, ilustrado na Figura 6.34(c), até às 02h35min onde há uma nova mudança estrutural no SIN.

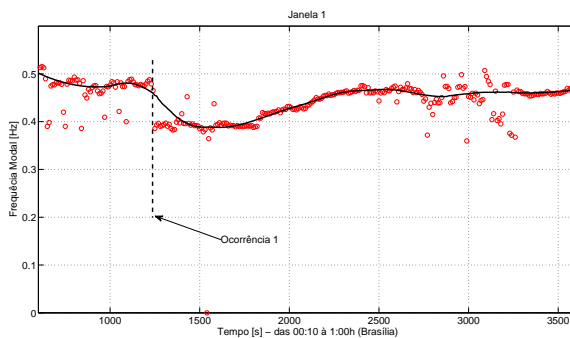
Esta mudança estrutural, Ocorrência 2, foi ocasionada pela abertura na LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2 devido à atuação da proteção de distância causada por sobre-fluxo às 02h35min [188]. A atuação do sistema de proteção ocorreu devido à elevada geração da UHE Xingó sem tomada de carga, que causou fortes oscilações na região Nordeste e também excitaram o modo Norte-Sul. O início destas oscilações ocorreu aproximadamente às 02h30min correspondendo ao tempo de ≈ 9000 s na Figura 6.34(a) e dura aproximadamente 330 segundos, Figuras 6.34(b) e 6.34(c).

A partir das 02h30min, devido ao excesso de geração na UHE de Xingó, a frequência de oscilação do modo Norte-Sul sofre uma rápida redução que vai de $\approx 0,417$ Hz para $\approx 0,36$ Hz (Figura 6.34(b)), permanecendo neste patamar até às 02h35min, instante da Ocorrência 2, iniciada pela abertura da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2. Às 02h36min, o excesso de geração começa a ser reduzido e as UG3 e UG4 de Xingó, as UG3, UG5 e UG6 da UHE Luiz Gonzaga são desligadas automaticamente. Uma sequência resumida dos principais eventos ocorridos durante a Janela 3 pode ser encontrada na Tabela 6.20.

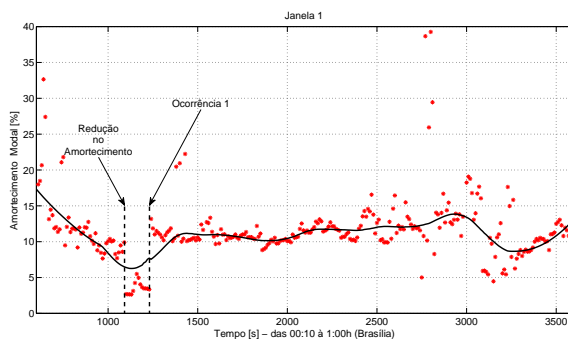
A Ocorrência 2 ocasiona mudanças bruscas tanto na frequência de oscilação como no amortecimento do modo Norte-Sul. Imediatamente após a Ocorrência 2 (mudança estrutural), a frequência de oscilação do modo Norte-Sul muda abruptamente de 0,36 Hz para 0,485 Hz (Figura 6.34(b)). Já o amortecimento é alterado de uma condição de limite de estabilidade com $\approx 3\%$ de amortecimento para $\approx 11,5\%$ de



(a) Variações de Frequência no SIN - Regiões Norte e Sudeste.

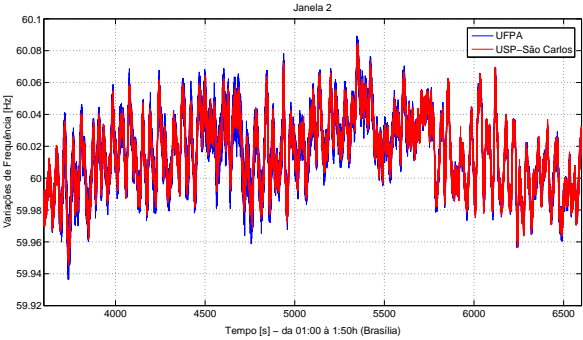


(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

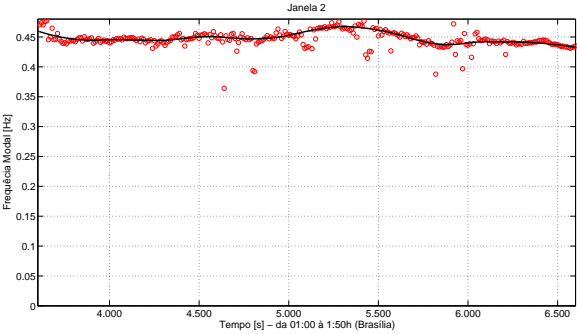


(c) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

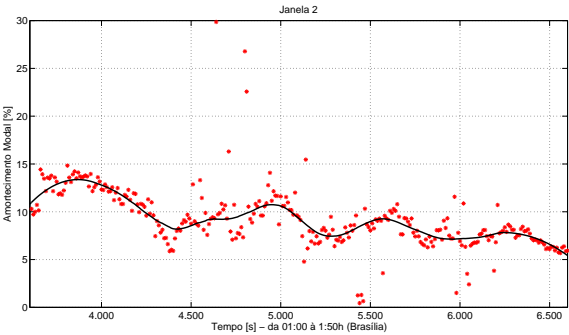
Figura 6.31: Monitoramento do Modo Norte-Sul - Primeira Ocorrência.



(a) Variações de Frequência no SIN - Regiões Norte e Sudeste.



(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(c) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

Figura 6.32: Monitoramento do Modo Norte-Sul - Intervalo Entre Ocorrências.



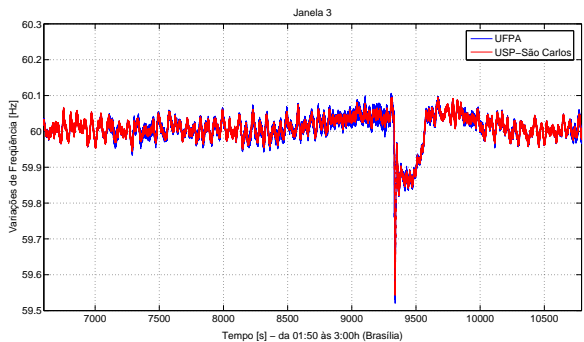
Figura 6.33: Tomada de Carga na Região Nordeste.

amortecimento (Figura 6.34(c)).

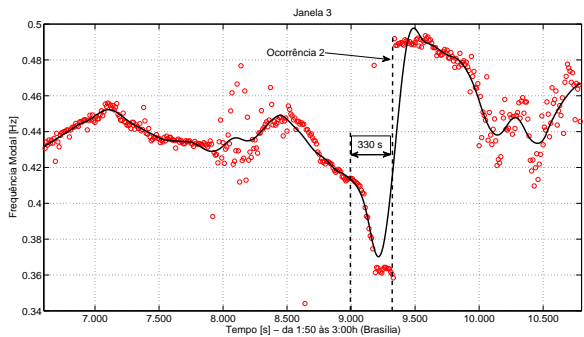
Observando a sequência de eventos da Tabela 6.20 em áreas da região Nordeste e confrontando com os espalhamentos encontrados no processo de detecção modal da Figura 6.34(b) e 6.34(c), pode-se associá-los principalmente aos intervalos onde há resincronização de máquinas. Por exemplo, o instante de tempo de ≈ 8000 s equivale à 02h14min, já o instante de tempo de ≈ 8500 s equivale à 02h22min. No período a partir das 02h45min (10000 s) ocorreram alguns chaveamentos no sistema de 500 kV e diversos no sistema de 230 kV na região Nordeste [188].

A fim de testar o desempenho do N4SID, considerando efeitos do fator de esquecimento (λ), apresentados na Seção 4.4, a Janela 3 foi analisada novamente. Os resultados para frequência e amortecimento modal estão apresentados nas Figuras 6.35(b) e 6.36(b), respectivamente, e podem ser comparados aos resultados do N4SID convencional sem fator de esquecimento ($\lambda = 1$), novamente apresentados nas figuras 6.35(a) e 6.36(a). Vale ressaltar que para tentar reduzir efeitos de dispersão modal no processo de identificação, foi considerado, além dos sinais de frequência de UFPA e USP-SC, o sinal de frequência da UFMG, fato que reduziu a dispersão modal nas regiões mencionadas para os casos com e sem o fator de esquecimento.

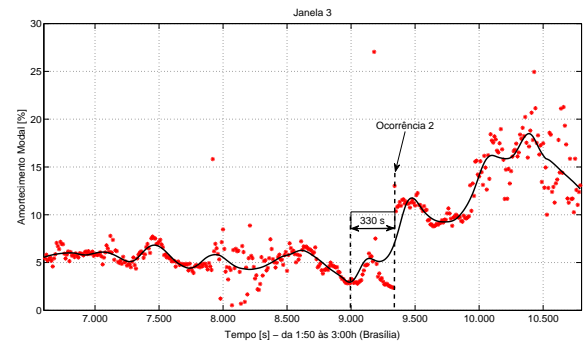
O fator de esquecimento ($\lambda = 0,999$) foi utilizado no N4SID, pois com este valor de λ o processo de rastreamento modal consegue acompanhar com menores atrasos as mudanças modais que para o caso onde $\lambda = 1$. Também com $\lambda = 0,999$ a dispersão modal durante o processo de identificação não é tão suscetível a ruídos [103, 104].



(a) Variações de Frequência no SIN - Regiões Norte e Sudeste.



(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(c) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

Figura 6.34: Monitoramento do Modo Norte-Sul - Segunda Ocorrência.

Tabela 6.20: Sequência de Eventos - Janela 3.

Instante	Instalação	Evento	Região/Área
02:12h	Paulo Afonso IV	Sincronizando UG2	Área Centro
02:12h	Paulo Afonso IV	Fechado o disjuntor 500 kV	Área Centro
02:13h	Irecê	Normalizado o transformador 230/69 kV	Área Sudoeste
02:19h	Usina Xingó	Sincronizando UG6	Área Centro
02:20h	Paulo Afonso IV	Sincronizando UG1	Área Centro
02:20h	Paulo Afonso IV	Fechado o disjuntor 500 kV	Área Centro
02:20h	Barreiras	Normalizado o transformador 230/69 kV	Área Sudoeste
02:22h	Usina Xingó	Sincronizando UG4	Área Centro
02:23h	Paulo Afonso	Energizado o link 230 kV para Usina Paulo Afonso I	Área Centro
02:24h	Usina Paulo Afonso I	Fechado o disjuntor 230 kV	Área Centro
02:24h	Usina Xingó	Fechado o disjuntor 500 kV	Área Centro
02:30h	Luiz Gonzaga	Sincronizando UG5	Interligação Norte/Nordeste
02:31h	Milagres	Normalizada a LT 500 kV Usina de Luiz Gonzaga/ Milagres C1	Área Centro
02:35h	Luiz Gonzaga/Sobradinho	Desligamento LT 500 kV Luiz Gonzaga/Sobradinho C2	Interligação Norte/Nordeste
02:36h	Luiz Gonzaga	Desarme das UG3, UG5 e UG6	Interligação Norte/Nordeste
02:36h	Usina Xingó	Desarme das UG3 e UG4	Área Centro
02:37h	Luiz Gonzaga	Desarme das UG4	Interligação Norte/Nordeste
02:39h	Luiz Gonzaga/Olindina	Desarme LT 500 kV Luiz Gonzaga/Olindina C1	Área Sul
02:40h	Milagres	Desarme LT 500 kV Milagres/Quixadá C1	Interligação Norte/Nordeste
02:45h	Usina Xingó	Desarme das UG1 e UG6	Área Centro

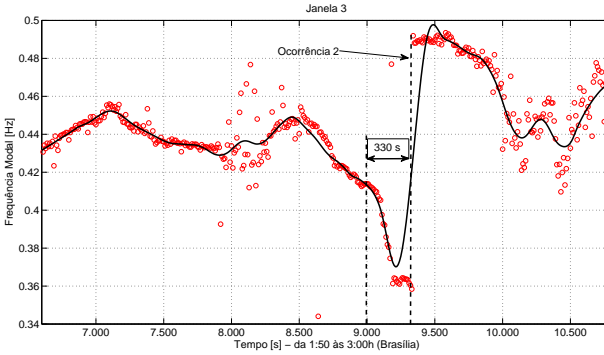
6.3.3 Análise do Período Transitório das Ocorrências 1 e 2

As análises correspondentes aos instantes onde o subsistema Nordeste é separado do SIN, Ocorrência 1, às 00h21min e da abertura da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2, Ocorrência 2, às 02h:35min são analisadas pelos métodos de Prony Multi-Sinais, N4SID, THH e TTH.

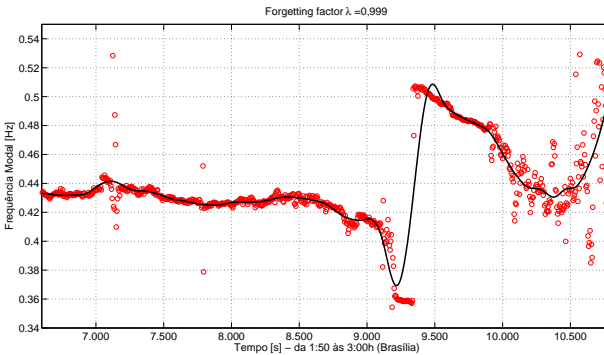
Para o método de Prony Multi-Sinais e o N4SID, os momentos dos grandes distúrbios foram analisados 5 vezes para cada método, permitindo o cálculo de valores médios e de desvios padrão para os autovalores identificados. Este procedimento pode ser realizado deslizando as respectivas janelas sob análise, cada uma com tamanho de 60 segundos, de 1/60 em 1/60 segundos e assumindo que os autovalores encontrados com estes pequenos deslocamentos possam ser considerados teoricamente os mesmos ¹⁷.

Os valores médios dos autovalores e os respectivos desvios padrão

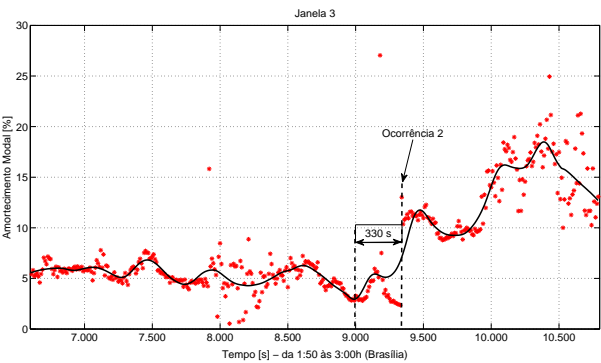
¹⁷Como cada janela possui 60 segundos ou 3600 amostras, assumiu-se que o deslocamento feito de uma em uma amostra totalizando um deslocamento total de 5/60 segundos não contribuisse significativamente no cálculo final dos resultados.



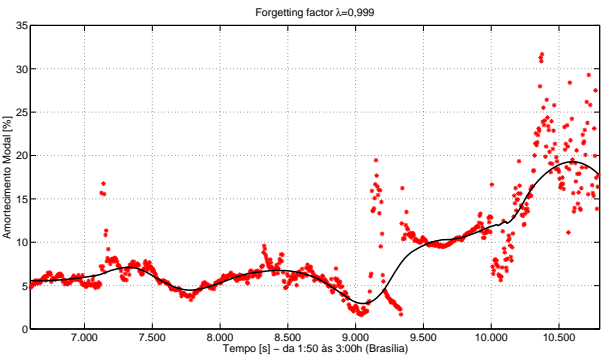
(a) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.

(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul - $\lambda = 0,999$.**Figura 6.35: Monitoramento da Frequência do Modo Norte-Sul - Segunda Ocorrência sem e com fator de esquecimento**

(σ) para o amortecimento e frequência do modo Norte-Sul estão apresentados na Tabela 6.21 para a Ocorrência 1 e na Tabela 6.22 para a Ocorrência 2. Apesar de um número pequeno de identificações “distintas” (5 identificações) para cada método e ocorrência ter sido realizado, quando se consideram os valores médios de frequência de oscilação com as respectivas incertezas de $\pm 1\sigma$ nota-se que ambos os métodos fornecem respostas que pertencem às mesmas faixas de valores. Quando análise semelhante é feita para os valores de amortecimento é necessário mais de um desvio padrão para que haja interseção de faixas para os métodos de Prony e o N4SID. Os resultados confirmam que os cálcu-



(a) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(b) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul - $\lambda = 0,999$.

Figura 6.36: Monitoramento do Amortecimento do Modo Norte-Sul - Segunda Ocorrência sem e com fator de esquecimento.

los de amortecimento têm desvios padrão maiores que os de frequência. Isto também pode ser confirmado comparando as *dispersões* no processo de monitoração contínua de modos eletromecânicos apresentados, por exemplo, nas figuras 6.35(b) e 6.36(b).

Tabela 6.21: Autovalores Identificados - Ocorrência 1. Janela 1

Prony				
Sinal	Ordem	Autovalor	Amortecimento $\pm \sigma$ [%]	Frequência $\pm \sigma$ [Hz]
Frequência	500	$-0,182 \pm 2,593j$	$6,99 \pm 0,07$	$0,413 \pm 0,0003$
N4SID				
Frequência	30	$-0,265 \pm 2,468j$	$10,66 \pm 0,89$	$0,390 \pm 0,03$

Tabela 6.22: Autovalores Identificados - Ocorrência 2. Janela 3

Prony				
Sinal	Ordem	Autovalor	Amortecimento $\pm \sigma$ [%]	Frequência $\pm \sigma$ [Hz]
Frequência	500	$-0,352 \pm 2,927j$	$11,90 \pm 0,05$	$0,47 \pm 0,004$
N4SID				
Frequência	30	$-0,376 \pm 2,917j$	$12,82 \pm 0,12$	$0,46 \pm 0,003$

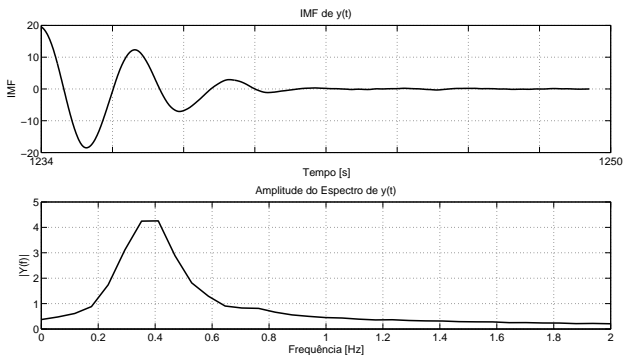
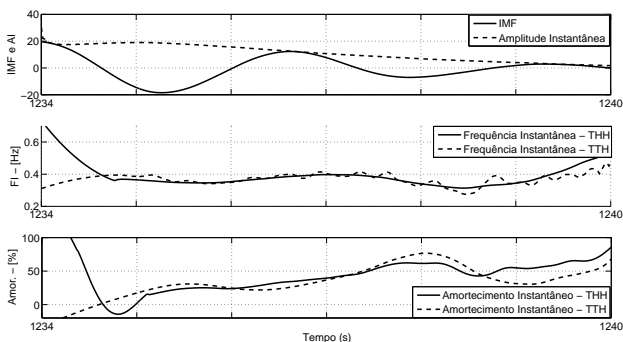
Para as Ocorrências 1 e 2 os valores calculados de frequências e amortecimentos instantâneos utilizando as Transformadas de Hilbert-Huang e de Teager-Huang podem ser encontrados nas Figuras 6.37(b) e 6.38(b). Estes resultados foram obtidos através das análises feitas nas IMFs obtidas para cada transitório, Figuras 6.37(a) e 6.38(a), respectivamente.

Comparações entre os valores de frequência instantânea (FI) para as Ocorrências 1 e 2 com os valores calculados pelo método de Prony Multi-sinais e o N4SID são coerentes, uma vez que para a Ocorrência 1 a FI oscila em torno de $0,39 \text{ Hz}$ e para a Ocorrência 2 a FI oscila em torno de $0,45 \text{ Hz}$ ¹⁸. Os valores de frequência de oscilação e de amortecimento apresentados nas Tabelas 6.21 e 6.22 também estão de acordo com os obtidos através do processo de monitoração contínua proposto. A verificação visual pode ser feita observando os valores “pontuais” instantâneos após cada ocorrência. Na Figura 6.31(b) o valor detectado é de $\approx 0,39 \text{ Hz}$ para a frequência e em torno de 11% a 12% para o amortecimento na Figura 6.31(c). Da mesma forma nas Figuras 6.34(b) e 6.34(c) tem-se os valores em torno de $0,485 \text{ Hz}$ para a frequência e de $\approx 11,9\%$ para o amortecimento.

Em relação aos cálculos de amortecimentos instantâneos, como visto na Seção 6.1.5 e Seção 6.1.6, quando aplicadas a THH e a TTH em sinais com transitórios de curta duração ¹⁹, os “*end effects*” tendem a corromper totalmente as estimações. Isto acontece nas figuras 6.37(b) e 6.38(b). Para estes tipos de transitório, recomenda-se o uso do método de Prony ou métodos de subespaço caso nenhum método para redução dos “*end effects*” tenha sido levado em consideração.

¹⁸Lembrando que estes cálculos estão sujeitos aos “*end effects*”.

¹⁹Vale ressaltar que o aumento do tamanho da janela sob análise não tem efeito na melhoria das estimações de amortecimento instantâneo. Os “*end effects*” estão associados ao tempo de duração das respectivas oscilações em cada IMF.

(a) IMF do *Ringdown 1* - Ocorrência 1.

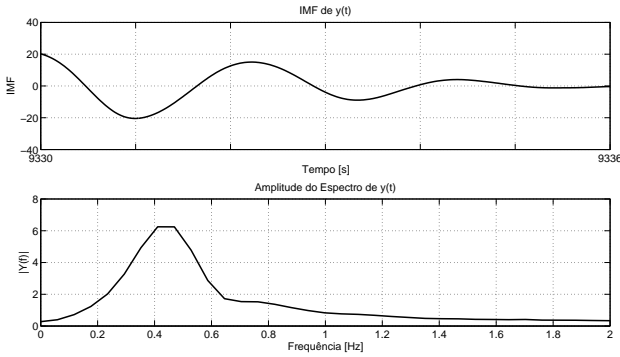
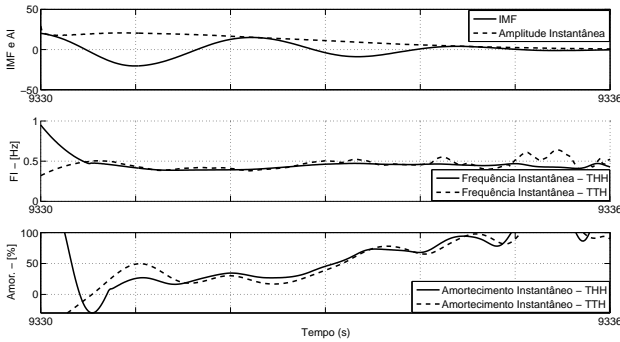
(b) Análise de Ocorrência 1 via THH e TTH.

Figura 6.37: Análise do Instante da Separação do Subsistema Nordeste do SIN.

6.3.4 Análise das Oscilações Causadas Pelo Despacho de Potência em Xingó

A causa da Ocorrência 2, Figura 6.29, foi iniciada pela elevada geração na UHE de Xingó sem tomada de carga [188], o que implicou na abertura da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga devido a atuação do sistema de proteção de distância devido a sobre fluxo.

Os efeitos do despacho de potência na UHE Xingó também ocasionaram oscilações eletromecânicas pouco amortecidas no sistema, que

(a) IMF do *Ringdown 2* - Ocorrência 2.

(b) Análise de Ocorrência 2 via THH e TTH.

Figura 6.38: Análise do Instante da Abertura da LT 500 kV Sobradinho/Luiz Gonzaga C2 às 02h35min.

podem ser visualizadas nos sinais do SMFS da baixa tensão cerca de 10 minutos antes da abertura da referida LT. As oscilações eletromecânicas estão mostradas na Figura 6.39(a) pela diferença angular entre UFPA e USP São Carlos até instantes antes da Ocorrência 2.

Aplicando a EEMD a esta diferença angular obtém-se a IMF relativa a tais oscilações, que é apresentada na Figura 6.39(b). Analisando a IMF com a transformada de Hilbert e o TKEO nota-se através das Figuras 6.40(a) e 6.40(b), respectivamente, que tal despacho de potência afetou significativamente o modo Norte-Sul. Na Figura 6.40(c) são

comparados as frequências e os amortecimentos ²⁰ instantâneos obtidos pela THH e a TTH.

Os valores de FI estão coerentes entre si e novamente coerentes com os obtidos através do conjunto de métodos *proposto* para monitorar continuamente modos eletromecânicos (ASRAM). Para melhor comparação entre os resultados da monitoração contínua de modos com a THH e a TTH, nas Figuras 6.41(a), 6.41(b), 6.41(c) e 6.41(d) os resultados obtidos via N4SID, com e sem fator de esquecimento, podem ser visualizados com melhor precisão.

Ao comparar as variações de frequência modal sem e com o uso do fator de esquecimento, mostradas nas Figuras 6.41(a) e 6.41(b) com as frequências instantâneas da Figura 6.40(c) nota-se que todos os métodos detectaram a não-estacionariedade. A não-estacionariedade na frequência modal é notada pela redução de frequência de patamares acima de 0,4 Hz para $\approx 0,35$ Hz.

A THH e a TTH são capazes de detectar a variação modal com maior rapidez que o N4SID, mesmo quando se utiliza um fator de esquecimento ($\lambda = 0,999$). Para uma detecção mais rápida de não estacionariedades em sinais utilizando métodos de identificação é necessário reduzir o fator de esquecimento para valores aproximadamente iguais a $\lambda = 0,997$, fato que aumenta a dispersão modal da identificação ²¹.

Para a monitoração contínua de sinais não-estacionários, um algoritmo, para ser mais adequado, deve usar um *fator de esquecimento adaptativo*, como foi utilizado para o método dos mínimos quadrados recursivo robusto em [28].

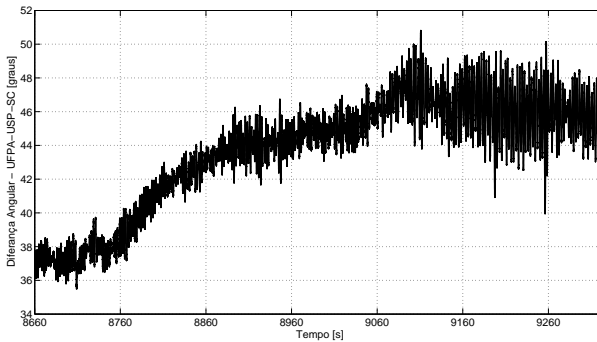
Os valores de amortecimento instantâneo tanto da THH quanto o *proposto* nesta tese, representado pela TTH indicam que o modo Norte-Sul oscilou com valores de amortecimento em torno de *zero* (Figura 6.40(c)), alternando entre valores positivos e negativos. As alternâncias de sinais se devem ao fato de que o amortecimento instantâneo apresenta propriedades locais e tende a ajustar o sinal das exponenciais em função da magnitude (crescente ou decrescente) da IMF. Os resultados obtidos via N4SID, para o mesmo intervalo de tempo, indicaram que o amortecimento do modo Norte-Sul oscilou em torno de 5% - Fi-

²⁰O método para cálculo do amortecimento instantâneo para a TTH foi *proposto* nesta tese Seção 4.6.4.

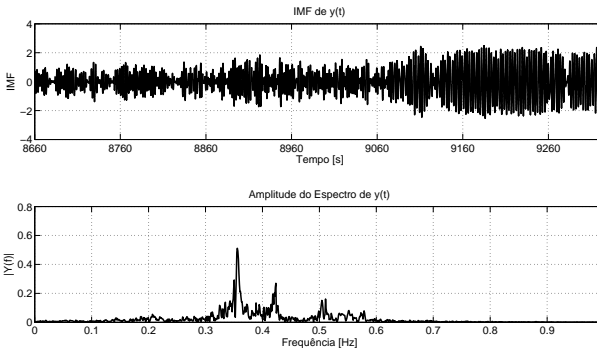
²¹A diminuição da exatidão no cálculo de modos sempre aumenta com a redução do fator de esquecimento [174]. A utilização do fator de esquecimento em conjunto com métodos de subespaço de estados, até o momento, nunca havia sido utilizada para a detecção de modos eletromecânicos.

guras 6.41(c) e 6.41(d).

Na Figura 6.40(c) nota-se que os valores de amortecimento instantâneo apresentaram valores quantitativos mais condizentes com a realidade se comparados aos valores encontrados nas Figuras 6.37(b) e 6.38(b). Este fato, como visto nas seções 6.14 e 6.1.6, está associado à maior duração de oscilações na mesma IMF, o que faz com que os *end effects* tenham menor influência nas partes intermediárias das curvas identificadas.

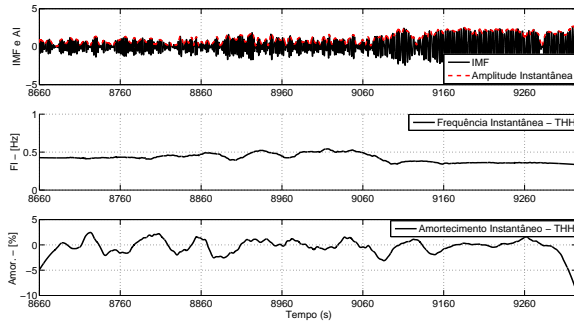


(a) Diferenças Angulares UFPA-USP-SC.

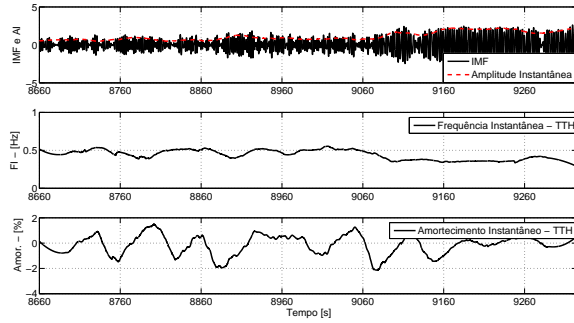


(b) IMF Referente às Oscilações Sustentadas.

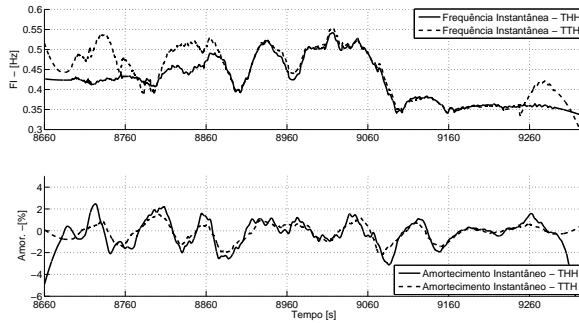
Figura 6.39: Sinal Analisado (Oscilações Sustentadas) - Despacho de Potência em Xingó.



(a) Oscilações Sustentadas - Transformada de Hilbert-Huang.

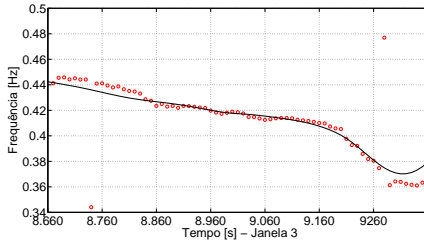


(b) Oscilações Sustentadas - Transformada de Teager-Huang.

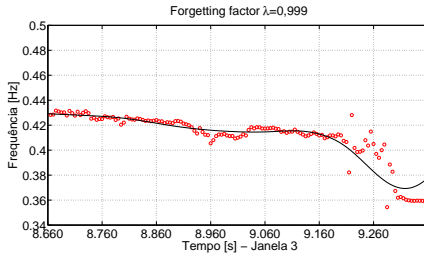


(c) Comparações Entre a Transformada de Hilbert-Huang e a de Teager-Huang.

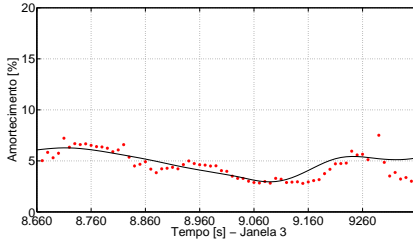
Figura 6.40: Monitoramento das Oscilações Sustentadas - Despaço de Potência em Xingó.



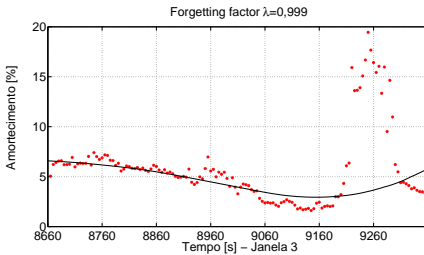
(a) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(b) Frequência Modal - Modo Inter-área Norte-Sul - $\lambda = 0,999$.



(c) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul.



(d) Amortecimento Modal - Modo Inter-área Norte-Sul - $\lambda = 0,999$.

Figura 6.41: Comparações entre os Modelos com e sem *Forgetting factor* - Despacho de Potência em Xingó.

6.3.5 Conclusões

A comparação dos diversos métodos utilizados para detecção de modos foi aplicada em dados reais amostrados pelo SMFS da baixa tensão, havendo concordância entre os resultados. Cada um dos métodos deve ser aplicado de acordo com os tipos de oscilações presentes nos dados. Quando se analisam dados de ambiente e grandes perturbações, ou seja, monitorações contínuas, os métodos de subespaço são indicados. Quando se deseja analisar períodos transitórios (*Ringdowns*), o método de Prony e as transformadas de Hilbert-Huang e de Teager-Huang são indicados, porém os dois últimos métodos apresentam melhores resultados quando a duração das oscilações é maior. Por outro lado, no caso de oscilações sustentadas (Figura 6.39(a)), o uso das transformadas de Hilbert-Huang e de Teager-Huang é preferido em relação ao uso do método de Prony.

Como visto, o monitoramento contínuo de modos eletromecânicos permite visualizar a evolução dos principais modos do sistema, indicando em tempo *quase real* a influência e as consequências que carregamentos, variações em intercâmbios e mudanças topológicas causam no sistema. Desta forma, o monitoramento contínuo é de grande utilidade para o aumento da segurança operativa de sistemas, podendo indicar se determinadas ações futuras podem ou não vir a comprometer o desempenho dinâmico dos sistemas.

7 CONTROLE BASEADO EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO FASORIAL

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados resultados da aplicação de diferentes métodos e estruturas de projeto de controladores usando dados de SMFS como realimentação. Para avaliar o projeto de controladores, um sistema teste é apresentado na Seção 7.4.1.

Técnicas de controle multivariável para o projeto de controladores são apresentadas na Seção 7.2, sendo elas baseadas em controle ótimo com e sem restrições estruturais e técnicas de controle robusto baseadas em LMIs. Também nesta seção, é apresentada uma técnica de controle baseada em otimização não-convexa e não-suave, capaz de calcular controladores com ordem pré-estabelecidas pelo usuário.

Na Seção 7.3 é proposta e apresentada uma nova alternativa para ser usada na estabilização de sistemas elétricos de potência. Esta metodologia possibilita o uso de variáveis algébricas e de estados na realimentação de controladores.

As técnicas de controle ótimo (LQR) e robusto (LMIs) apresentadas na Seção 7.2 aplicadas em conjunto com a estrutura de controlador descrita na Seção 7.3 são usadas para estabilizar o sistema teste através de realimentação estática.

Na Seção 7.5 a técnica de controle baseada em otimização não-convexa e não-suave é utilizada para projetar diversos controladores, ajustados para diferentes condições críticas de operação do sistema teste, que farão parte de um controle adaptativo tipo *Gain Schedule*. O método de Prony multi-sinais, juntamente com um índice proposto, são utilizados para detectar condições críticas de operação e, através do reconhecimento de padrões via cálculo de autovalores e seus respectivos *mode shapes*, enviar um comando para chavear o controle *Gain Schedule* para a posição adequada para amortecer as oscilações eletromecânicas detectadas.

7.2 MÉTODOS DE PROJETO DE CONTROLADORES

Nesta seção, o projeto de controladores através de realimentação de estados com o uso de técnicas tais como a do regulador do tipo linear

quadrático sem e com restrições estruturais e Inequações Matriciais Lineares (LMIs) são abordados. Nestas abordagens mencionadas, a formulação apresentada na Seção 7.3.2 possibilita a realimentação dos estados mensuráveis e o uso de variáveis algébricas para o *cálculo* de estados não mensuráveis na realimentação.

Também nesta seção o emprego de LMIs é feito via realimentação de saídas em sistemas na forma algébrico-diferencial, conhecidos como *descritores*, onde restrições algébricas no estado são ou não feitas, dependendo parte-se da formulação algébrico-diferencial ou diretamente da formulação de sistemas descritores, respectivamente.

Em ambas abordagens, de sistemas na forma algébrico-diferencial ou *descritores*, o projeto é feito via realimentação de saídas, o que possibilita o projeto de controladores sem a necessidade de eliminação das variáveis algébricas do sistema elétrico de potência.

O uso de LMIs em sistemas onde não se eliminam as variáveis algébricas possibilita seu uso para fins de controle e ainda possibilita que a inclusão de incertezas no modelo seja feita de forma mais adequada. Isto porque quando se eliminam variáveis algébricas no sistema, as operações matriciais envolvidas no processo fazem com que os parâmetros incertos se espalhem por quase todos os elementos do sistema reduzido, que passa a apresentar somente variáveis de estado.

A utilização de LMIs também possibilita o projeto de controladores robustos, com abordagem politópica onde é possível se encontrar um regulador ótimo para mais de um ponto de operação do sistema, além de poder considerar em sua abordagem a alocação dos autovalores em determinadas regiões do plano complexo, especificada pelo projetista.

A técnica de controle baseada em otimização não-convexa e não-suave é utilizada para projetar controladores de ordem polinomial 2, apesar de ser capaz de calcular controladores estáticos ou com ordem polinomial a critério do projetista. Tal técnica também possibilita que o projeto de controladores sejam feitos utilizando abordagem politópica, possibilitando encontrar um controlador para diversos pontos de operação do sistema.

7.2.1 Controle LQR sem e com Restrições Estruturais

Nesta seção a formulação do problema do regulador linear quadrático sem e com restrições estruturais é apresentada. O objetivo é

projetar controladores e considerar que os sinais de SMFS sejam incorporados na realimentação do controle.

Quando o regulador linear quadrático sem restrições estruturais é usado, o controlador resultante é do tipo centralizado. Quando o regulador linear quadrático com restrições estruturais é usado, somente variáveis locais são usadas na realimentação.

Considerando-se um modelo de SEP linearizado em torno de um ponto de operação, na forma de espaço de estados (7.1), onde x é o vetor de estados, u é o vetor de controle e y a variável de saída, o problema do regulador linear quadrático resume-se em minimizar um índice de desempenho (7.2) sujeito às restrições de (7.1) [189].

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{7.1}$$

$$J(x, u) = \int_{t_0}^T [x'Qx + u'Ru] dt\tag{7.2}$$

O índice J é sempre um escalar e $Q \geq 0$ e $R > 0$ são as matrizes que atribuem *pesos* aos estados e às variáveis de controle do sistema, sendo sempre simétricas.

A lei de controle ótima obtida pela minimização é dada por:

$$u = -R^{-1}B'P^*x = -K^*x\tag{7.3}$$

onde K^* é o ganho ótimo e $P^* \geq 0$, $P = P'$ é solução da equação de diferencial não linear de Riccati (7.4).

$$\dot{P} = -A'P - PA - Q + PBR^{-1}B'P\tag{7.4}$$

Quando T está bem distante de t_0 ou $T \rightarrow \infty$ em (7.2) a equação (7.4) passa a ser uma equação algébrica do tipo:

$$A'P + PA + Q - PBR^{-1}B'P = 0\tag{7.5}$$

e o ganho K^* passa a ser constante.

A lei de controle $u = -R^{-1}B'P^*x = -K^*x$ faz com que o sistema (7.1) torne-se estável ¹ com margem de fase $\phi_{min} \leq -60^\circ$, $\phi_{max} \geq 60^\circ$ e margem de ganho de $6dB$ [67].

¹Se o par (A, B) for estabilizável.

Para o caso do regulador linear quadrático com restrições estruturais é necessário que uma restrição seja imposta à matriz de realimentação de estados \mathbf{K} . Estas restrições podem ser dadas por realimentação de saídas e descentralização.

O método foi originalmente apresentado em [190] e usado para a estabilização de SEP em [191, 192] e em [86] onde os sinais usados na realimentação de controladores são obtidos através de SMFS. Detalhes sobre algoritmo podem ser encontrados em [191, 192].

7.2.2 Controle Via Inequações Matriciais Lineares - LMIs

Uma LMI é uma inequação na forma:

$$F(x) \triangleq F_0 + \sum_{j=1}^m F_j x_j > 0, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

na qual $F(x) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}$ é simétrica ($F_j = F_j'$), constante e afim na *variável de busca* $x \in \mathbb{R}^m$, que são as variáveis escalares a serem determinadas de forma a satisfazer, se possível, a desigualdade (7.6). Quando existe uma solução x para $F(x) > 0$ diz-se que a LMI é factível.

Normalmente quando se projetam sistemas de controle, a formulação mais usada é a de espaço de estados onde variáveis algébricas são eliminadas e o sistema utilizado é um sistema diferencial puro.

Apesar da maior simplicidade de se trabalhar com a abordagem puramente diferencial, ela apresenta alguns inconvenientes, como por exemplo:

1. A eliminação de algumas variáveis algébricas que poderiam ser usadas para fins de controle;
2. Quando se deseja trabalhar com incertezas, a eliminação das variáveis algébricas ocasiona o espalhamento das incertezas por quase todos os parâmetros do sistema.

Nesta seção, a formulação de sistemas na forma de espaço de estados, na forma algébrico-diferencial e de sistemas descritores são apresentadas para que a realimentação de saídas possa ser feita e assim tentar estabilizar SEPs via formulação LMI. A realimentação de estados também é apresentada.

Um sistema descritor em sua forma algébrico-diferencial desacoplada é representado por (7.7), com $x \in \mathbb{R}^n$ o vetor das variáveis de estado, $z \in \mathbb{R}^l$ o vetor das variáveis algébricas, $u \in \mathbb{R}^m$ o vetor de entrada e $y \in \mathbb{R}^p$ o de variáveis de saída.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J_1 x + J_2 z + B_1 u \\ 0 &= J_3 x + J_4 z + B_2 u \\ y &= C_1 x + C_2 z \end{aligned} \quad (7.7)$$

Antes da formulação do problema via LMIs é necessário que os conceitos de estabilidade e estabilizabilidade quadrática para sistemas algébrico-diferenciais sejam apresentados [193].

Definição 1.1 - Estabilidade Quadrática [194, 193] - Dado um politopo convexo $\mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q$ de vértices Ψ_i e um sistema algébrico-diferencial:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J_1 x + J_2 z \\ 0 &= J_3 x + J_4 z \end{aligned} \quad (7.8)$$

de forma que este sistema faça parte de um dos vértices do politopo tal que:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \in \mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q, \quad \Psi_i = \begin{bmatrix} J_{1i} & J_{2i} \\ J_{3i} & J_{4i} \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Então o sistema (7.8) e (7.9) é quadraticamente estável se existir uma função de Lyapunov $V(x) = x'Px > 0$, $\forall x \neq 0$ tal que sua derivada temporal para as trajetórias do sistema (7.8), (7.9) satisfaça (7.10).

$$\begin{cases} \dot{V}(x) = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} J_1'P + PJ_1 & PJ_2 \\ J_2'P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} < 0, \\ \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \in \mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q, \forall \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = 0 \end{cases} \quad (7.10)$$

Definição 1.2 - Estabilizabilidade Quadrática [194, 193]

- Dado um politopo convexo $\mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q$ de vértices Ψ_i e um sistema algébrico-diferencial:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= J_1x + J_2z + B_1u \\ 0 &= J_3x + J_4z + B_2u\end{aligned}\tag{7.11}$$

de forma que este sistema faça parte de um dos vértices do politopo tal que:

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 & B_1 \\ J_3 & J_4 & B_2 \end{bmatrix} \in \mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q, \quad \Psi_i = \begin{bmatrix} J_{1i} & J_{2i} & B_{1i} \\ J_{3i} & J_{4i} & B_{2i} \end{bmatrix}\tag{7.12}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{V}(x) &= \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} (J_1 + B_1K_1)'P + P(J_1 + B_1K_1) & P(J_2 + B_1K_2) \\ (J_2 + B_1K_2)'P & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} < 0, \\ \begin{bmatrix} J_1 & J_2 & B_1 \\ J_3 & J_4 & B_2 \end{bmatrix} \in \mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q, \forall \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} J_3 + B_2K_1 & J_4 + B_2K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \right.\tag{7.13}$$

Então o sistema 7.11 e 7.12 é quadraticamente estabilizável pela lei de controle $u = \mathbf{K}_1\mathbf{x} + \mathbf{K}_2\mathbf{z}$ se existirem matrizes \mathbf{K}_1 e \mathbf{K}_2 uma função de Lyapunov $V(x) = x'Px > 0$, $\forall x \neq 0$ tal que sua derivada temporal para as trajetórias do sistema (7.11), (7.12) satisfaça (7.13).

◇◇

Caso se deseje analisar estabilidade e estabilizabilidade quadrática para a realimentação de saídas, basta considerar $u = \mathbf{K}_y$ com $y = \mathbf{C}x$.

Após apresentados estes conceitos é importante ressaltar que, na maioria das vezes, os problemas de controle não aparecem na forma explícita de LMIs. Assim, é necessário que manipulações algébricas sejam efetuadas para deixar as inequações matriciais na forma afim de controle. Se a natureza do problema original for convexa, a probabilidade de se conseguir reescrevê-lo na forma de LMIs é grande. Duas ferramentas matemáticas importantes usadas na tentativa de reescrever o problema original na forma de LMIs são apresentadas no Anexo B,

sendo elas o *Complemento de Schur* e o *Lema de Finsler*.

Realimentação de Saída

O processo de estabilização de SEP via o emprego de realimentação de estados é inviável na prática, pois além de não se ter acesso a diversas variáveis de estado, podem haver restrições das grandes distâncias geográficas. Assim, é usual a realimentação de saídas de variáveis mensuráveis e a utilização de SMFS para contornar a barreira imposta pela distância.

Sistemas Descritores

Uma alternativa à realimentação de variáveis de estado para estabilização de sistemas é lidar com a realimentação de variáveis de saída, que nesta seção é feita a fim de analisar a possibilidade de seu uso em sistemas do tipo algébrico-diferenciais via formulação LMI.

A realimentação de saída estática desacoplada considerada é feita da seguinte forma:

$$u = [K_1 \ K_2] \cdot y, \text{ onde } y = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix}$$

Este tipo de abordagem considera independência entre as variáveis algébricas e diferenciais.

Teorema 7.1. [194, 193] *Seja um politopo $\mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q$ de vértices Ψ_i dados e considere um sistema incerto*

$$\begin{aligned} \dot{x} &= J_1 x + J_2 z + Bu \\ 0 &= J_3 x + J_4 z \\ y &= \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7.14}$$

supondo que

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \in \mathbf{Co}[\Psi]_{i=1}^q, \quad \Psi_i = \begin{bmatrix} J_{1i} & J_{2i} \\ J_{3i} & J_{4i} \\ C_{1i} & 0 \\ 0 & C_{2i} \end{bmatrix} \tag{7.15}$$

O sistema (7.14), (7.15) é quadraticamente estabilizável pela realimentação de saída $u = [\mathbf{K}_1 \quad \mathbf{K}_2]y$ se existirem matrizes de dimensões adequadas P , L , F_1 , F_2 e M , tal que as seguintes LMIs sejam factíveis:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} J'_{1i}P - C'_{1i}F'_1B' + PJ_{1i} - BF_1C_{1i} & PJ_{2i} - BF_2C_{2i} \\ J'_{2i}P - C'_{2i}F'_2B' & 0 \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} J_{3i} & J_{4i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{3i} & J_{4i} \end{bmatrix}' L' < 0 \\ PB = BM, & \forall i = 1, \dots, q \\ P > 0 \end{cases} \quad (7.16)$$

Em caso afirmativo, os ganhos de realimentação são dados por: $\mathbf{K}_1 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_1$ e $\mathbf{K}_2 = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F}_2$, sendo $V(x) = x'Px$ uma função de Lyapunov para o sistema algébrico-diferencial realimentado.

Em [6] ao invés de se lidar com sistemas algébricos-diferenciais desacoplados com restrições algébricas no estado, como feito até o momento, a análise é feita diretamente em sistemas descritores (7.17).

$$\begin{aligned} E\dot{x} &= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u \\ y &= [C] \cdot \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.17)$$

As seguintes definições são fundamentais para a análise de sistemas descritores ²:

- (I) - O feixe ou *pencil* $sE - A$ ou o par (E, A) é regular se $\det(sE - A)$ é não identicamente zero;
- (II) - Para um feixe regular $sE - A$, os autovalores finitos de $sE - A$ são os modos finitos de (E, A) ;
- (III) - O par (E, A) é *admissível* se ele for regular e não possui modos impulsivos, i.e., o grau de $\det(sE - A)$ é igual ao posto de E e não existem modos finitos instáveis.

Lema 7.1. [6] O par (E, A) é admissível se e somente se existe $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$

² Assume-se que: $A = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$.

tal que

$$\begin{aligned} E'P &= P'E \geq 0 \\ A'P + P'A &< 0 \end{aligned} \quad (7.18)$$

A partir do lema anterior, pode-se estender o caso para onde existe realimentação estática.

Lema 7.2. [195] *O sistema descritor 7.17 realimentado é admissível se e somente se existem $P \in \mathbb{R}$ e $K \in \mathbb{R}$ de dimensões compatíveis tal que*

$$\begin{cases} E'P = P'E \geq 0 \\ (A - BKC)'P + P'(A - BKC) < 0 \end{cases} \quad (7.19)$$

$$u = -Ky, \quad y = Cx$$

Parte-se diretamente para o caso de realimentação de saída estática robusta com abordagem politópica, uma vez que a extensão de casos nominais para casos politópicos é trivial.

Teorema 7.2. [195] *O problema admissível de realimentação estática robusto contínuo, obtido a partir de sistemas tal como (7.17) é factível se existem P e N e uma matriz não singular M satisfazendo*

$$\begin{cases} E'P = P'E \geq 0 \\ A_i'P + P'A_i - C_i'B'N' - BNC_i < 0 \\ PB = BM, & \forall i = 1, \dots, q \\ P > 0 \end{cases} \quad (7.20)$$

$$\text{com } u = -Ky = -M^{-1}Ny$$

Sistemas Diferenciais

No caso de sistemas puramente diferenciais na forma de espaço de estados, a realimentação de saída por LMIs pode ser obtida via o Teorema 7.3:

Teorema 7.3. [196] *O problema de realimentação de saída estática robusto contínuo, obtido a partir de sistemas na forma de espaço de estados é factível se existe P e N e uma matriz não singular M satisfazendo*

zendo

$$\begin{cases} A_i'P + P'A_i - C_i'B'N' - BNC_i < 0 \\ PB = BM, \\ P > 0 \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, q \quad (7.21)$$

com $u = -Ky = -M^{-1}Ny$

Realimentação de Estados - Sistemas Diferenciais

O caso de realimentação de estados também é apresentado, uma vez que com os procedimentos apresentados na Seção 7.3.2 é possível se obter um controlador robusto via abordagem politópica com o uso de LMIs.

Teorema 7.4. [66] *O problema de realimentação estática robusto contínuo, obtido a partir de sistemas na forma de espaço de estados é factível se existe se existe P e N e uma matriz não singular M satisfazendo*

$$\begin{cases} A_iW + WA_i' - BL - L'B' < 0 \\ W > 0, \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, q \quad (7.22)$$

com $u = -LW^{-1}x = -Kx$, $\Rightarrow K = LW^{-1}$ e $W = P^{-1}$

Além de se poder fazer uma estabilização robusta via abordagem politópica, é também possível fazer alocação de pólos dentro de determinadas regiões do plano complexo \mathbb{C} , que é também conhecida como (\mathcal{D} -estabilidade) [73, 74].

Esta abordagem garante que o sistema seja exponencialmente estável e apresente comportamento dinâmico desejado imposto pela região \mathcal{D} onde os autovalores estão localizados.

Nesta tese, a região escolhida para a localização dos autovalores do sistema é um setor cônico, caso a LMI seja factível, o amortecimento mínimo do sistema é dado por: $\zeta = \cos\theta$, sendo θ o ângulo da Figura 7.1 ³.

Teorema 7.5. [73, 74] *O sistema $\dot{x} = Ax$ é estabilizável pela lei de controle $u = -Kx$ e \mathcal{D} -estável se e somente se existe uma matriz P*

³Para o equacionamento adotado $r \rightarrow \infty$ e $\alpha = 0$

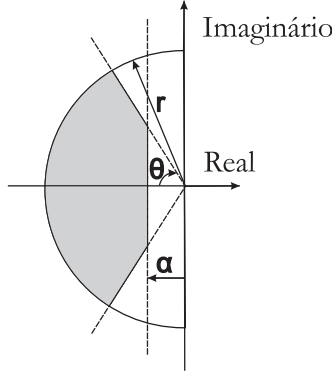


Figura 7.1: Região de \mathcal{D} -Estabilidade.

simétrica e definida positiva tal que:

$$H \otimes P(A - BK) + H' \otimes P(A - BK)' < 0 \quad (7.23)$$

onde a operação \otimes corresponde ao produto de Kronecker⁴, e a matriz H é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ -\cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix}$$

Desta forma os autovalores dos sistemas realimentados $(A_i - BK)$, $\forall i = 1, \dots, q$, estão localizados dentro da região \mathcal{D} da Figura 7.1 se existirem W e L e as seguintes LMIs forem factíveis:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \sin\theta(A_i W + W A_i' - L' B' - B L) & \cos\theta(A_i W - W A_i' + L' B' - B L) \\ \cos\theta(W A_i' - A_i W - L' B' + B L) & \sin\theta(A_i W + W A_i' - L' B' - B L) \end{bmatrix} < 0 \\ W > 0, \quad \forall i = 1, \dots, q \end{cases} \quad (7.24)$$

⁴O produto de Kronecker: $A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}B & \dots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \dots & a_{mn}B \end{bmatrix} \in \mathbb{C}_{mp,nq}$, com $A \in \mathbb{C}_{m,n}$ e $B \in \mathbb{C}_{p,q}$

$$u = -LW^{-1}x = -Kx, \Rightarrow K = LW^{-1} \text{ e } W = P^{-1}$$

7.2.3 Controle Via Otimização Não-convexa e Não-suave

Nesta seção, considera-se o projeto de controladores via otimização não-convexa e não-suave. Com esta abordagem serão projetados controladores centralizados, embora haja a possibilidade de implementação de controladores descentralizados.

Para que o controle centralizado seja implementado, considera-se também, neste trabalho e em [175], os *atrasos do sistema de transmissão de dados*. Este atraso corresponde ao tempo de transmissão do local das medições (PMUs) para o local onde se localiza o controlador central (PDC) e vice-versa. A modelagem destes atrasos pode ser encontrada em [197, 198] e embora tenham sido *utilizadas nesta tese e em [175]*, tiveram sua formulação suprimida no documento.

Projeto do Controlador

Considere o sistema linear dado por:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\omega + \mathbf{B}_2\mathbf{u} \quad (7.25)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}_1\mathbf{x} + \mathbf{D}_{11}\omega + \mathbf{D}_{12}\mathbf{u} \quad (7.26)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_2\mathbf{x} + \mathbf{D}_{21}\omega + \mathbf{D}_{22}\mathbf{u} \quad (7.27)$$

onde $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$, \mathbf{u} é a entrada de controle, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ é a saída (sensor), ω é o sinal de entrada do índice de desempenho e \mathbf{z} é o sinal de saída do índice de desempenho. Para simplificar, assume-se que a matriz de realimentação direta $\mathbf{D}_{22} = 0$.

O controlador é dado por

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c\mathbf{x}_c + \mathbf{B}_c\mathbf{u}_c \quad (7.28)$$

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{C}_c\mathbf{x}_c + \mathbf{D}_c\mathbf{u}_c \quad (7.29)$$

onde $\mathbf{x}_c \in \mathbb{R}^{n_c}$ é o vetor de estados do controlador, $\mathbf{u}_c \in \mathbb{R}^p$ é o vetor dos sinais estabilizantes, $\mathbf{y}_c \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de saída do controlador.

O sistema em malha fechada, com $\omega = 0$, pode ser representado

da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{D}_c & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.30)$$

Definindo as matrizes

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

é o vetor de estados aumentado $\mathbf{x}_a = [\mathbf{x}^T \mathbf{x}_c^T]^T$, um sistema aumentado pode ser definido por

$$\dot{\mathbf{x}}_a = \mathbf{A}_a \mathbf{x}_a + \mathbf{B}_a \mathbf{u}_a \quad (7.31)$$

$$\mathbf{y}_a = \mathbf{C}_a \mathbf{x}_a \quad (7.32)$$

e o sistema controlado dado por (7.30) corresponde ao sistema aumentado, dado por (7.31)-(7.32), com a realimentação de saídas

$$\mathbf{u}_a = -\mathbf{K} \mathbf{y}_a \quad (7.33)$$

onde

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_c & \mathbf{C}_c \\ \mathbf{B}_c & \mathbf{A}_c \end{bmatrix} \quad (7.34)$$

A dimensão da matriz \mathbf{K} é $(n_u + n_c) \times (n_y + n_c)$. Assim, $(n_u + n_c) \times (n_y + n_c)$ parâmetros devem ser determinados. O caso onde $n_c = 0$ corresponde à realimentação de saídas estática.

A estrutura dos controladores é modelada pela matriz de funções de transferência [199, 198, 175]:

$$\mathbf{PSS}(s) = \begin{bmatrix} pss_{11}(s) & \dots & pss_{1p}(s) \\ pss_{21}(s) & \dots & pss_{2p}(s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ pss_{m1}(s) & \dots & pss_{mp}(s) \end{bmatrix} \quad (7.35)$$

onde p e m são o número de entradas e saídas, respectivamente. Para um controle descentralizado, esta matriz é diagonal com $m = p$. Esta

função de transferência pode ser representada na forma de equações de estado como em (7.28)-(7.29). O problema do projeto do controlador se reduz projeto do controlador se reduz em encontrar a matriz K em (7.34). Para o caso do projeto de controladores dinâmicos, usa-se nesta tese e em [175] a ordem 2 para as funções de transferência, como em (7.36). Também, no processo da síntese de controladores desta tese, foram considerados os tempos de atraso de transmissão de dados, assim como em [175, 198].

$$PSS_{mp}(s) = \frac{s^2 + a.s + b}{s^2 + c.s + d} \quad (7.36)$$

O problema do projeto por realimentação de saídas pode ser formulado como um problema de minimização, com a escolha de uma função objetivo adequada. Esta função pode incluir requisitos de desempenho tais como amortecimento do sistema, tempo de acomodação e robustez.

Os parâmetros do controlador, para cada ponto de operação, são encontrados usando otimização não-convexa e não-suave.

Em [200], um método de otimização de primeira ordem baseado no gradiente amostrado foi proposto. Detalhes deste método podem ser encontrados em: [200, 201, 202].

Em [203], o método do gradiente amostrado foi combinado a outros dois métodos de otimização, o Quase-Newton e o algoritmo de feixes locais ⁵, resultando em um algoritmo híbrido.

Este algoritmo possui três passos:

1. um algoritmo quase-Newton (BFGS) gera uma sequência com boas propriedades de convergência, sem, no entanto, avaliar a matriz Jacobiana a cada iteração, diferentemente do método de Newton. Assim, o algoritmo fornece um método rápido para aproximar um minimizador local, pois uma estimativa da derivada é utilizada. O algoritmo apresenta bom desempenho para problemas não-suaves e convexos;
2. um algoritmo baseado no método do feixe (*bundle*) verifica a otimalidade local para o melhor ponto encontrado pelo algoritmo quase-Newton (BFGS), ou seja, o mínimo encontrado é comparado com os gradientes dessa vizinhança. Caso a condição de oti-

⁵ Local bundle algorithms.

malidade não seja atendida, o método passa para a fase seguinte. Este algoritmo é apropriado para funções convexas e não-suaves;

3. o gradiente amostrado refina a aproximação do minimizador local caso o algoritmo baseado no método do feixe falhe. Esse algoritmo é próprio para o tratamento de funções não-convexas e não-suaves.

Este algoritmo híbrido foi implementado no pacote do Matlab chamado *HIFOO*⁶ e é um programa livre [203, 204]. Este programa foi utilizado para projeto de controladores centralizados apresentados nesta tese.

7.3 REALIMENTAÇÃO DE VARIÁVEIS ALGÉBRICAS E DE ESTADO

Nesta seção é apresentado um método que resultou na publicação do artigo [2], onde é mostrado que a partir de cálculos da matriz de realimentação de estados \mathbf{K} é possível, através de dados amostrados pelo SMFS e multiplicações matriciais, calcular variáveis de estado a partir de variáveis algébricas.

A realimentação de variáveis de estado e algébricas em sistemas de potência vem se tornando uma realidade devido à utilização do sistema de SMFS, que possibilita a utilização de novos sinais de entrada, sejam eles locais ou remotos, nos controladores empregados em sistemas de potência.

Os SMFS permitem a medição de variáveis do sistema que podem dar informações adicionais de estados não mensuráveis e servir de entrada para controladores, podendo ser utilizadas estruturas de controle centralizadas e descentralizadas através de realimentação de estados e variáveis algébricas.

Uma vantagem do uso do SMFS é que (muitas vezes) não é necessário calcular variáveis de estado a serem utilizadas na realimentação de estados, pois a realimentação de variáveis de estado mensuráveis combinadas com a realimentação de variáveis algébricas pode fazer com que o sistema controlado atinja resultados semelhantes. Estas afirmações serão demonstradas adiante.

As medições de variáveis algébricas e de estado efetuadas pelo SMFS permitem a determinação de uma lei de controle baseada na

⁶<http://www.cs.nyu.edu/~overton/software/hifoo/>.

realimentação completa de estados, onde a modelagem das máquinas síncronas é feita com modelo simplificado.

As simulações serão efetuadas em um sistema algébrico-diferencial não linear, dado por (2.3), onde as variáveis de estado do sistema linearizado a serem utilizadas para o projeto dos controladores são as tensões internas da máquina, velocidade angular e ângulos. O vetor de variáveis algébricas z é composto pelas partes reais e imaginárias das tensões das barras terminais juntamente com as componentes dq de tensões e correntes dos geradores do sistema.

7.3.1 Modelos de Geradores

O modelo usualmente empregado em simulações de estabilidade eletromecânica é o modelo da máquina síncrona de pólos salientes que representa os efeitos subtransitórios, representando-se um enrolamento amortecedor em cada eixo (d e q). As equações para este modelo são dadas pelo conjunto de equações (7.37).

$$\begin{aligned}
 \dot{E}_q'' &= \frac{-E_q'' + E_q' - (x_d' - x_d'') I_d}{T'' d_o} \\
 \dot{E}_d'' &= \frac{-(x_q' - x_q'') I_q - E_d''}{T'' q_o} \\
 \dot{E}_q' &= \frac{-E_q' - (x_d - x_d') I_d + E_{fd}}{T' d_o} \\
 \dot{\delta} &= \omega - \omega_r \\
 \dot{\omega} &= \frac{\omega_r}{2H} [P_m - P_e - D(\omega - \omega_r)]
 \end{aligned} \tag{7.37}$$

As equações do estator em variáveis de Park ⁷ que fazem a cone-

⁷É importante ressaltar que os sinais das equações do estator dependem da referência adotada para os eixos dq . Neste caso foram levados em consideração a formulação utilizada no programa ANATEM.

xão do gerador com a rede são dadas pelo conjunto de equações (7.38):

$$\begin{aligned} E_q'' - V_q &= r_a I_q - \dot{x}_d'' I_d \\ E_d'' - V_d &= r_a I_d - \dot{x}_q'' I_q \end{aligned} \quad (7.38)$$

Para o modelo simplificado utilizado no projeto do controle foi usado o modelo de gerador com pólos salientes, onde desprezam-se todos os enrolamentos amortecedores e/ou correntes no ferro do rotor e seus efeitos $\dot{x}_q' = \dot{x}_d'$ e $E_d' = 0$, logo são representados os efeitos transitórios.

As equações diferenciais deste modelo são:

$$\begin{aligned} \dot{E}_q' &= \frac{-E_q' - (x_d - x_d') I_d + E_{fd}}{T' d_o} \\ \dot{\delta} &= \omega - \omega_r \\ \dot{\omega} &= \frac{\omega_r}{2H} [P_m - P_e - D(\omega - \omega_r)] \end{aligned} \quad (7.39)$$

As equações do estator em variáveis de Park que fazem a conexão do gerador com a rede são:

$$\begin{aligned} E_q' - V_q &= r_a I_q - \dot{x}_d' I_d \\ -V_d &= r_a I_d - \dot{x}_q' I_q \end{aligned} \quad (7.40)$$

A transformação entre a referência síncrona da rede e a referência $d - q$ de Park é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_{re} \\ V_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (7.41)$$

$$\begin{bmatrix} I_{re} \\ I_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \delta \\ -\cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (7.42)$$

Os reguladores de tensão são todos representados por uma função

de transferência de primeira ordem (7.43):

$$\frac{E_{fd}}{V - V_{ref}} = \frac{K_e}{sT_e + 1} \quad (7.43)$$

Somente cargas estáticas foram consideradas na modelagem de obtenção do controle.

7.3.2 Estrutura do Sistema de Controle e seu Projeto

Para o projeto do controlador supõe-se que todas as barras terminais dos geradores do sistema possuam uma PMU. Assim as grandezas fasoriais de tensão e corrente são medidas, possibilitando ainda a obtenção das respectivas magnitudes e fases.

O projeto do controle foi feito utilizando o modelo de gerador com pólos salientes (7.39). As equações (7.40), (7.41) e (7.42) são linearizadas e as variações $\Delta E'_q$ e $\Delta \delta$ para cada gerador podem ser calculadas através das medidas das tensões e correntes terminais dos respectivos geradores, fornecidas pelo SMFS.

Após as linearizações mencionadas, deve-se eliminar os termos correspondentes às tensões e correntes nos eixos $d-q$ escrevendo-os em função das tensões e correntes reais e imaginárias. O próximo passo é isolar $\Delta \dot{E}'_q$ e $\Delta \dot{\delta}$, o que leva a (7.44).

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{E}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re} \\ \Delta V_{im} \\ \Delta I_{re} \\ \Delta I_{im} \end{bmatrix} \quad (7.44)$$

onde se define a equivalência em (7.45) para ser usada na equação (7.46):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k} \dot{\delta} \\ \mathbf{k} \dot{E}'_q \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{bmatrix} \quad (7.45)$$

Através deste procedimento é possível calcular os estados não mensuráveis dos geradores em função de variáveis algébricas fornecidas pelo SMFS. Deve-se lembrar que as equações do estator tiveram suas dinâmicas desprezadas, logo as variações nos estados só podem ser calculadas aproximadamente.

Vale a pena mencionar que ao invés de tensões e correntes em (7.44), poderiam ser usadas medições de potência ativa e reativa para o cálculo das variações dos estados.

A terceira e última variável de estado do modelo de gerador (7.39) é a velocidade angular do rotor, que pode ser medida diretamente ou ainda estimada pelo SMFS. A tensão de campo do gerador E_{fd} deve ser medida.

O próximo passo é fazer o cálculo de uma realimentação completa de estados para o sistema, encontrando a matriz de realimentação K .

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta E'_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{k} \delta_{mi} \\ \mathbf{k} \mathbf{E}'_{qmi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re_i} \\ \Delta V_{im_i} \\ \Delta I_{re_i} \\ \Delta I_{im_i} \end{bmatrix} \quad (7.46)$$

$$\begin{aligned} u &= \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \Delta E'_{q1} \\ \Delta \omega_1 \\ \Delta E_{fd1} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{k} \delta_{m1} & 0 & 0 \\ \mathbf{k} \mathbf{E}'_{qm1} & 0 & 0 \\ \mathbf{0} & 1 & 0 \\ \mathbf{0} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re_1} \\ \Delta V_{im_1} \\ \Delta I_{re_1} \\ \Delta I_{im_1} \\ \Delta \omega_1 \\ \Delta E_{fd1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.47)$$

A generalização para aplicação desta técnica de controle em um sistema multimáquinas leva à equação (7.48).

As submatrizes que compõem a matriz de realimentação de estados podem ainda ter sua estrutura formada de maneiras diferentes. Elas podem ser cheias quando utiliza-se no momento do projeto do controle uma estrutura centralizada, ou assumir uma estrutura de forma bloco-diagonal quando leva-se em consideração restrições estruturais

que origina o projeto de controladores descentralizados [190].

$$u = [\mathbf{K}_{realim}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \vdots \\ \Delta\delta_{ref} \\ \Delta E'_{q1} \\ \Delta E_{q2} \\ \vdots \\ \Delta E'_{qref} \\ \Delta\omega_1 \\ \vdots \\ \Delta\omega_{ref} \\ \Delta E_{fd1} \\ \vdots \\ \Delta E_{fdref} \end{bmatrix}$$

$$= [\mathbf{K}_{realim}] \begin{bmatrix} \mathbf{k}\delta_{m1} & \mathbf{0} & \dots & -\mathbf{k}\delta_{mref} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{k}\delta_{m2} & \dots & -\mathbf{k}\delta_{mref} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{k}\delta_{mref} - \mathbf{k}\delta_{mref} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{kE}'_{qm1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{kE}'_{qm2} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{kE}'_{qmref} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta V_{re1} \\ \Delta V_{im1} \\ \Delta I_{re1} \\ \Delta I_{im1} \\ \vdots \\ \Delta V_{ref} \\ \Delta V_{imref} \\ \Delta I_{ref} \\ \Delta I_{imref} \\ \Delta\omega_1 \\ \vdots \\ \Delta\omega_{ref} \\ \Delta E_{fd1} \\ \vdots \\ \Delta E_{fdref} \end{bmatrix}$$

(7.48)

Para se fazer a realimentação de variáveis algébricas e de estado, usando a equação (7.48) é necessário que a matriz de realimentação de estados do sistema, dada por $\mathbf{K}_{\text{realim}}$, seja calculada. As técnicas de controle estudadas neste trabalho para tal cálculo foram apresentadas na Seção 7.2. Este procedimento permite que as variáveis de estado δ_i e E_{qi} , $i = 1, \dots, n_{\text{maquinas}}$ possam ser substituídas pelas componentes reais e imaginárias das tensões e correntes terminais das respectivas máquinas e usadas como realimentação do controle centralizado e descentralizado.

Vale a pena lembrar que no modelo do SEP utilizado para projeto deste tipo de controle, foram consideradas somente as variáveis de estado δ_i , ω_i , E'_{qi} e Efd_i , $i = 1, \dots, n_{\text{maquinas}}$. Assim, o projeto do controlador é feito para um modelo dado por (7.39) e utilizado em um modelo dado por (7.37).

Os resultados de suas aplicações é apresentado na Seção 7.4.3.

7.4 APLICAÇÃO DE SINAIS DE MFS EM CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

Nesta seção, as estruturas centralizada e descentralizada são utilizadas a fim de estabilizar um sistema teste.

7.4.1 O Sistema Teste

O sistema de potência teste é um sistema composto por sete barras e cinco máquinas, que representa um modelo equivalente modificado do sistema Sul-Sudeste brasileiro, conforme a Figura 7.2, onde o equivalente sudeste foi adotado como máquina de referência. Este sistema é composto por quatro usinas hidrelétricas, Itaipu, Salto Segredo, Salto Santiago e Foz do Areia Figura 7.2 . Todas as máquinas síncronas são representadas por modelos de quinta ordem e apresentam reguladores de tensão idênticos de primeira ordem com limitadores de tensão de campo modelados. Os dados do sistema podem ser encontrados em [205].

Este sistema, além de ser instável, apresenta problemas de controlabilidade, pois é um sistema de fase não mínima que apresenta zeros complexos conjugados no semi-plano direito, próximos aos pó-

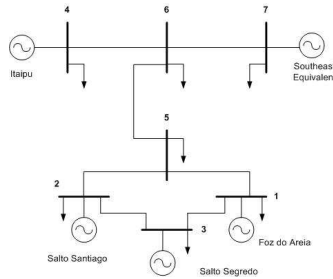


Figura 7.2: Sistema Teste - Equivalente do Sistema Sul-Sudeste Brasileiro.

los instáveis e portanto foi demonstrado em [205, 197] que ele só pode ser estabilizado usando pelo menos dois estabilizadores de sistema de potência.

Através de um estudo de análise modal pode-se constatar que para esta configuração o sistema apresenta quatro modos:

- *Modo 1 - Interárea:* O equivalente sudeste oscila contra a máquina de Itaipu;
- *Modo 2 - Interárea:* Salto Segredo, Salto Santiago e Foz do Areia oscilam contra o equivalente sudeste e Itaipu;
- *Modo 3 - Local:* Salto Santiago oscilando contra Salto Segredo e Foz do Areia;
- *Modo 4 - Local:* Foz do Areia oscilando contra Salto Segredo.

7.4.2 Análise Modal

A análise modal deste sistema de potência foi realizada e os modos do sistema, sem PSSs, estão apresentados na Tabela 7.1.

Em [205], podem ser encontrados os PSSs projetados para estabilizar este sistema. Os modos eletromecânicos, com estes PSSs, estão mostrados na Tabela 7.2.

Tabela 7.1: Modos Eletromecânicos (sem PSS)

Autovalores	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
$-2,01 \pm 9,17i$	1,46	21,44
$-1,80 \pm 9,18i$	1,46	19,26
$0,65 \pm 5,39i$	0,86	-11,91
$-0,22 \pm 5,88i$	0,93	3,84

Tabela 7.2: Modos Eletromecânicos (com PSS)

Autovalores	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
$-0,33 \pm 5,21j$	0,83	6,38
$-1,207 \pm 3,24j$	0,51	34,92
$-1,77 \pm 13,90j$	2,21	12,63
$-1,84 \pm 13,87j$	2,21	13,18

7.4.3 A Estrutura do Controle

Nesta seção duas estruturas de controle são usadas e empregadas, a centralizada e a descentralizada. Na estrutura centralizada, mostrada na Figura 7.3 todos os dados que são usados na realimentação dos controladores são amostrados pelas PMUs, onde assume-se a existência de uma PMU em cada uma das barras terminais dos geradores do sistema teste da Figura 7.2.

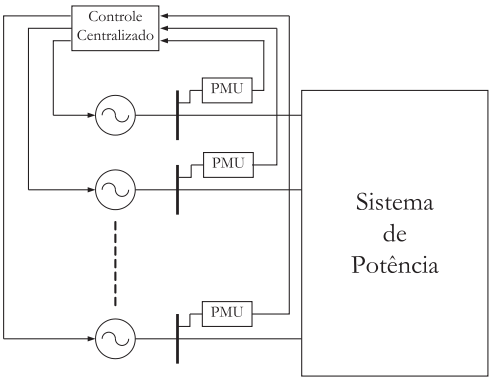


Figura 7.3: Estrutura de Controle Centralizado.

Na estrutura descentralizada, mostrada na Figura 7.4, apenas sinais locais das barras terminais dos respectivos geradores são usados

para a realimentação dos controladores locais.

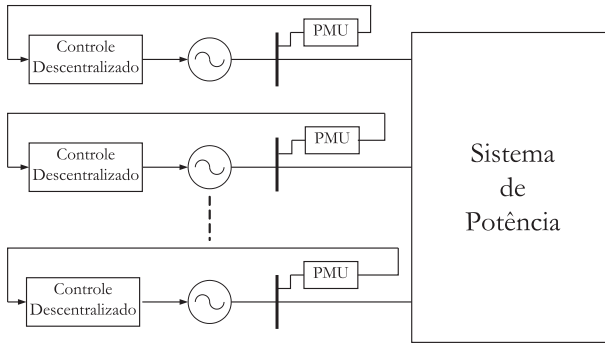


Figura 7.4: Estrutura de Controle Descentralizado.

O método de projeto usado também varia de acordo com cada tipo de configuração de controle. Para o controle centralizado usa-se o controle LQR sem restrições estruturais e também LMIs. Já para o controle descentralizado é necessário o uso de restrições estruturais e caso se deseje usar LMIs é necessário impor restrições em determinadas matrizes.

Atrasos de tempo estão envolvidos na transmissão de dados usados no controle centralizado. Estes atrasos envolvem os tempos de transmissão das PMUs para o PDC e do PDC para as PMUs.

O PDC faz o papel do controlador central do sistema e portanto calcula todos os sinais de controle que são enviados aos respectivos geradores.

Na estrutura de controle centralizado, Figura 7.3, o controlador central permite que cálculos nos estados não mensuráveis sejam efetuados para as variáveis $\Delta E'_q$ e $\Delta \delta$, como apresentado na Seção 7.3. Assim o projeto do controlador via realimentação completa de estados pode ser feito via métodos apresentados na Seção 7.2.

No controle descentralizado, Figura 7.4, somente as medidas locais, estados e variáveis algébricas, são usadas no cálculo do sinal de controle de cada gerador.

Neste caso também é assumida a existência de uma referência síncrona comum, fornecida pelo sistema GPS, que permite que o cálculo das variáveis seja feito e os tempos de atraso são desprezíveis.

Como não foram considerados os tempos de atraso nos projetos

dos controladores, considera-se que a transmissão de dados é feita de maneira ideal. A incorporação de atrasos pode ser levada em consideração no projeto dos controladores modelando os atrasos, por exemplo, na forma de equações de estado e aumentando as matrizes de estado do sistema linearizado original, como mencionado na Seção 3.3.4. A consideração de atrasos no projeto de controladores é abordada na Seção 7.5.

O projeto dos controladores é feito usando modelos de gerador de terceira ordem, ou seja, Máquina Síncrona de Pólos Salientes (Efeitos Transitórios) equação (7.39). As matrizes de estado foram obtidas através do programa *PacDyn*, tanto para o modelo de máquina de terceira ordem quanto para o de quinta ordem (7.37).

Os autovalores associados aos modos eletromecânicos para os modelos de gerador de terceira e de quinta ordem, para os ESP propostos em [205] são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3: Modos Eletromecânicos do Sistema Teste.

Modelo	Modos	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
3° Ordem	Modo 1	$-0,086 \pm 5,67j$	0,90	1,52
	Modo 2	$-0,68 \pm 5,52j$	0,88	12,35
	Modo 3	$-0,16 \pm 8,78j$	1,4	1,86
	Modo 4	$-0,17 \pm 8,65j$	1,38	1,97
5° Ordem	Modo 1	$-0,33 \pm 5,22j$	0,83	6,38
	Modo 2	$-1,207 \pm 3,24j$	0,51	34,92
	Modo 3	$-1,77 \pm 13,90j$	2,21	12,63
	Modo 4	$-1,84 \pm 13,87j$	2,21	13,18

Os autovalores associados aos modos eletromecânicos para os modelos de gerador de terceira e de quinta ordem, tanto para o controle centralizado quanto para o descentralizado são apresentados nas Tabelas 7.4 e 7.5.

Tabela 7.4: Modos Eletromecânicos do Sistema Teste - Controle Centralizado (LQR).

Modelo	Modos	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
3° Ordem	Modo 1	$-1,94 \pm 6,47j$	1,03	28,78
	Modo 2	$-0,83 \pm 5,59j$	0,89	14,69
	Modo 3	$-1,63 \pm 9,11j$	1,45	17,67
	Modo 4	$-1,075 \pm 8,92j$	1,42	11,97
5° Ordem	Modo 1	$-1,48 \pm 7,73j$	1,23	18,79
	Modo 2	$-0,80 \pm 6,14j$	0,98	12,87
	Modo 3	$-2,68 \pm 10,55j$	1,68	24,60
	Modo 4	$-2,44 \pm 9,97j$	1,59	23,74

Tabela 7.5: Modos Eletromecânicos do Sistema Teste - Controle Descentralizado (LQR).

Modelo	Modos	Autovalor	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
3° Ordem	Modo 1	$-1,055 \pm 6,42j$	1,02	16,21
	Modo 2	$-1,97 \pm 5,068j$	0,81	36,26
	Modo 3	$-1,28 \pm 9,98j$	1,59	12,72
	Modo 4	$-1,19 \pm 9,64j$	1,53	12,30
5° Ordem	Modo 1	$-0,48 \pm 6,89j$	1,097	6,90
	Modo 2	$-3,35 \pm 7,36j$	1,17	41,47
	Modo 3	$-2,25 \pm 11,036j$	1,76	19,96
	Modo 4	$-2,141 \pm 10,56j$	1,68	19,86

7.4.4 Simulações no Domínio do Tempo

Nesta seção são comentados os resultados do uso de técnicas de controle LQR e LMIs, apresentadas na Seção 7.2, em conjunto com a metodologia de realimentação de variáveis algébricas e de estados *proposta* na Seção 7.3 em simulações não-lineares. As simulações que consideram o projeto de controladores via otimização não-convexa e não-suave são apresentadas na Seção 7.5.

Simulações usando Técnicas de Controle Multivariável

Os controladores centralizado e descentralizado que usam como realimentação sinais de variáveis de estado e algébricas, Seção 7.3, foram incluídos no programa ANATEM através dos Controladores Definidos pelo Usuário (CDU).

As simulações não-lineares apresentadas nesta seção levam em consideração somente os modelos de quinta ordem dos geradores ⁸.

As estruturas de controle centralizado e descentralizado foram implementadas ⁹ e para o funcionamento do controle houve a necessidade de inclusão de filtros tipo passa alta conhecidos por *wash-out* nas variáveis de realimentação, sendo elas de estado ou algébricas.

Nas figuras 7.5 a 7.7 são apresentados os comportamentos dinâmicos do sistema teste da Figura 7.2 com a utilização dos controladores

⁸ Modelos de terceira ordem não podem ser modelados no ANATEM.

⁹ Vale salientar que estas implementações são muito trabalhosas, envolvendo a exportação de mais de uma centena de sinais para o sistema teste e também que o programa não lida com multiplicações matriciais, ficando impraticável a implementação destes tipos de controladores para sistemas com maior número de máquinas.

propostos originalmente para o sistema [205] e também para os controladores ótimos com e sem restrições estruturais usando SMFS. Nestas simulações foram aplicados distúrbios do tipo curto-circuito trifásico franco na barra 1 do sistema, com duração de 50 ms, que é eliminado *sem a abertura* de linhas de transmissão.

Na Figura 7.5, são comparados os comportamentos dinâmicos do sistema sem e com a presença dos ESP propostos em [205]. O sistema sem ESP é instável, conforme pode ser verificado também na Tabela 7.1.

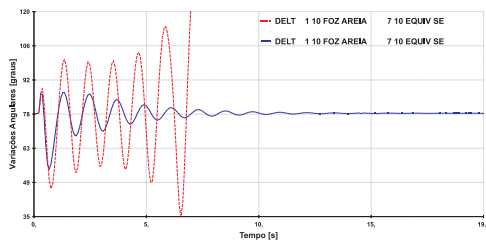


Figura 7.5: Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ sem e com PSS.

Na Figura 7.6 o comportamento dinâmico dos controladores ótimos centralizado (curva tracejada) e descentralizado é comparado. Nota-se que no controle centralizado existem oscilações sustentadas, fato que é objetivo de estudos futuros ¹⁰.

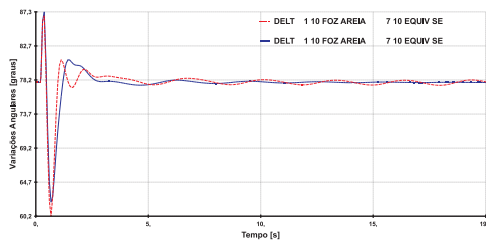


Figura 7.6: Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ Controle Centralizado e Descentralizado.

¹⁰A inclusão de um pequeno fator de amortecimento (D) na máquina de referência soluciona este problema.

Comparando os controles centralizado (curva tracejada), descentralizado (curva azul) e o original (curva pontilhada) proposto em [205], Figura 7.7, nota-se que os controladores propostos são capazes de amortecer o sistema de maneira bem mais rápida do que os controladores propostos originalmente, que utilizam técnicas *seqüenciais* de ajuste baseadas em controle clássico (*compensação*). Isto se deve principalmente ao fato do uso de vários sinais de realimentação do SMFS nos controladores propostos, além de seu projeto ter sido obtido via técnicas de controle ótimo multivariável, que não é seqüencial.

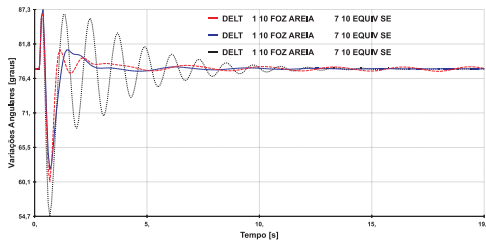


Figura 7.7: Variações Angulares para Curto Circuito 3 ϕ Controle Centralizado, Descentralizado e com PSS.

Para avaliar o comportamento dos controladores propostos, também foram aplicados defeitos do tipo que causam mudança estrutural do sistema.

Nas figuras 7.8 e 7.9 pode-se observar o comportamento dinâmico do sistema para a abertura da linha de transmissão que liga as barras 1 a 5 do sistema teste.

Na Figura 7.8 os controles centralizado e descentralizado são comparados para a abertura da referida linha de transmissão. Em ambos os casos o sistema não suporta o defeito devido a uma mudança estrutural no sistema, ou seja, os controladores não são robustos.

Na Figura 7.9 observa-se que o controle projetado de forma clássica e seqüencial que usa apenas um sinal de realimentação local é mais robusto que o controle centralizado proposto, pois mantém a estabilidade do sistema para a mudança estrutural.

Os resultados mostram que o uso dos controladores centralizado e descentralizado é capaz de amortecer oscilações de forma mais eficiente, se comparado ao controle original, somente quando não existe mudança estrutural no sistema.

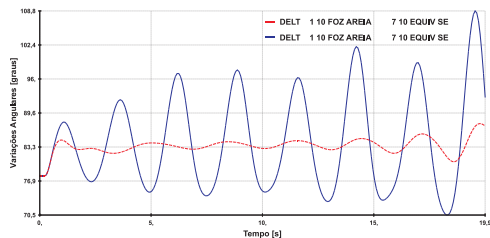


Figura 7.8: Variações Angulares para Abertura de LT 1-5 - Controle Centralizado e Descentralizado.

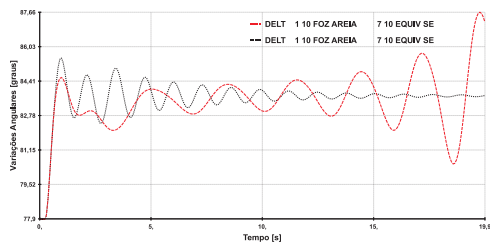


Figura 7.9: Variações Angulares para Abertura de LT 1-5 - Controle Centralizado e com PSS.

A inclusão de modelos de gerador de ordem mais elevadas, dados pelas equações (7.37) não pode ser feita, pois o sistema de equações que faz a conexão do gerador à rede torna-se linearmente dependente, conforme as equações (7.38) e (7.40).

De acordo com diversas simulações não lineares realizadas e monitoramento de variáveis de estado, parece haver problemas de incompatibilidade entre modelos lineares estáticos em relação à referência síncrona girante do sistema, fato que deve ser investigado.

Projeto via Técnicas de Controle Robusto - LMIs

Técnicas de obtenção de controladores via LMIs foram objeto de *intenso trabalho nesta pesquisa, principalmente em relação a estabilização de sistemas descritores ou sistemas na forma algébrico-diferencial.*

Quando foram usados realimentação de estados na formulação

LMI, foi possível encontrar ganhos de realimentação sem problema algum com factibilidade ou convergência, inclusive considerando abordagem politópica com restrições impostas por critérios de \mathcal{D} -estabilidade.

Para os casos considerando abordagem politópica foi encontrada uma *única* matriz de realimentação com ganhos que garantiam a estabilidade robusta do sistema linearizado para *diferentes condições estruturais do sistema*, como por exemplo a eliminação da linha de transmissão que liga as barras 1 à 5. Quando esta matriz de realimentação foi usada em simulações não lineares para o controlador centralizado, o desempenho do sistema tornou-se pior que para o caso do controle ótimo (LQR) apresentado na Seção 7.4.4.

Na estabilização de sistemas na forma de espaço de estados, os testes e simulações realizados para estabilizar o sistema teste da Figura 7.2 *utilizando a metodologia proposta para realimentação de variáveis algébricas e de estado* apresentaram desempenho inferior aos resultados obtidos via controle LQR para a mesma situação. Desta forma, tais simulações foram omitidas.

Em relação a estabilização de sistemas descritores ou sistemas na forma algébrico-diferencial, para o sistema teste (Figura 7.2), os conjuntos de LMIs formuladas *sem a eliminação das variáveis algébricas* do sistema ¹¹ e considerando realimentação de saídas não foram factíveis ou apresentaram problemas numéricos de convergência ¹².

Nas tentativas de estabilização de sistemas na forma algébrico-diferencial ou descritores, foram usados os pacotes de algoritmos dos programas *Scilab* e *Matlab*, sendo que nas simulações usadas no Matlab as tentativas foram feitas para o pacote do próprio Matlab e também para pacotes feitos por usuários - *SeDuMi* ¹³.

7.5 DETECÇÃO E CONTROLE DE OSCILAÇÕES

Nesta seção, o método de Prony multi-sinais é usado para identificar modos de oscilação eletromecânicos pouco amortecidos e usar tais informações para controle de sistemas de potência.

São identificados os autovalores com pouco amortecimento e seus

¹¹ Sistema na forma algébrico-diferencial ou descritor.

¹²De acordo com comunicações pessoais com o co-autor de [196], as LMIs são factíveis para sistemas descritores pequenos, com ordens inferiores a 30.

¹³<http://sedumi.mcmaster.ca/>

respectivos autovetores associados. Diversas condições críticas de operação são identificadas através de modelos, onde os respectivos autovalores fornecem padrões dados pelos respectivos conjuntos de *mode shape*. Estas condições operativas críticas são usadas para projetar um conjunto de controles centralizados, ajustados para cada condição.

A partir da monitoração do sistema via SMFS, após a detecção de condições críticas de operação via comparações entre padrões de *mode shapes* identificados e os previamente obtidos via análise do respectivo modelo, um controle do tipo *Gain Schedule* (GS) é utilizado. O controle GS central altera automaticamente para o respectivo controlador que fornece amortecimento adequado para a condição crítica detectada. O conjunto de controladores é projetado utilizando técnicas de controle via otimização não-convexa e não-suave, Seção 7.2.3. É importante ressaltar que todos os PSSs do sistema permanecem operando com seus respectivos ajustes e que o controle centralizado fornece amortecimento através de sinais adicionais.

7.5.1 O Método de Controle

A técnica de controle proposta neste trabalho baseia-se no controle adaptativo *Gain Schedule* (GS), onde o conjunto de controladores é projetado via otimização não-convexa e não-suave, Seção 7.2.3, e utiliza os modos de oscilação e seus *mode shapes* associados como método de identificação do ponto de operação do sistema.

A monitoração de oscilações permite que os modos eletromecânicos menos amortecidos sejam detectados e desta forma condições críticas de operação podem ser identificadas, juntamente com os autovetores do sistema. O padrão dos autovetores fornece uma indicação do ponto de operação do sistema e desta forma os controladores podem ser projetados para condições operativas onde o sistema apresenta comportamento deteriorado.

Para que o método possa ser usado, devem existir PMUs instaladas nas barras de geradores que farão parte do sistema de controle adaptativo. Os dados amostrados pelas PMUs são utilizados tanto para identificação como para a realimentação dos controladores.

Nas próximas duas próximas seções, a identificação dos modos de oscilação e o método de projeto de controladores são apresentados.

7.5.2 Identificação das Condições Críticas de Operação

O Método de Prony

Como visto na Seção 4.2, o método de Prony permite que os resíduos, autovalores (λ_i), autovetores à direita (v_i) e à esquerda (w_i) possam ser calculados a partir da análise de um ou mais sinais:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n v_i (w_i' x_0) e^{\lambda_i t} = \sum_{i=1}^n R_i e^{\lambda_i t}$$

A identificação dos modos de sistemas via método de Prony geralmente resulta em estimativas conflitantes quando diversos sinais, pertencentes ao mesmo sistema, são analisados separadamente. O uso do método de Prony multi-sinais [98] permite que diversos sinais possam ser analisados simultaneamente, aumentando a robustez e a exatidão dos resultados, fornecendo um *único* conjunto modos estimados.

O método de Prony necessita de $2n$ amostras para identificar um modelo de ordem n , desta forma resultados mais exatos podem ser obtidos utilizando a ordem máxima possível do modelo, que equivale ao número total de amostras dividido por dois. Como esta abordagem, em determinados casos, pode resultar em um elevado custo computacional, foi proposta a realização de reamostragens dos sinais para frequências mais baixas.

7.5.3 Estimação de *mode shapes*

Diversos trabalhos já apresentaram métodos para a estimação de *mode shapes* a partir de medições realizadas por SMFS. Em [206, 207], métodos espectrais são usados e em [49], os autovetores associados a modos com baixo amortecimento são estimados através da análise de Fourier.

Neste trabalho, os sinais de potência ativa das barras terminais de geradores são utilizados para estimar os *mode shapes* das potências elétricas associados aos autovalores com baixo amortecimento. Os sinais são amostrados por PMUs e a utilização do método de Prony multi-sinais possibilita determinar os resíduos associados a cada autovalor de cada um dos sinais analisados, conforme (7.5.2). Estes resíduos

forneem uma estimativa dos *mode shapes* das potências elétricas.

7.5.4 Identificação dos Pontos de Operação

Em [187] é mostrado que a configuração do sistema e o respectivo ponto de operação determinam os padrões dos *mode shapes*. Embora seja difícil demonstrar as relações entre condições operativas do sistema e os *mode shapes*, testes realizados em [187] mostraram que condições críticas podem ser obtidas através dos *mode shapes*.

A seguir, um índice que compara os autovetores estimados com os previamente calculados é proposto. Este índice serve para detectar se os padrões de *mode shapes* detectados correspondem a condições críticas de operação do sistema e realizar o chaveamento para diferentes estruturas de controladores previamente calculadas.

Para um sistema com n_g geradores assuma que

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{g1} \\ \mathbf{v}_{g2} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{gn_g} \end{bmatrix}$$

seja o vetor obtido pelos autovetores correspondentes às potências elétricas de cada gerador, associados a um autovalor λ .

Assuma que $\hat{\mathbf{v}}$ são os *mode shapes* estimados pelos resíduos do método de Prony multi-sinais.

A condição operativa pode ser determinada em tempo real fazendo a comparação entre os autovalores críticos calculados e os detectados e através do índice MSI (*Mode Shape Index*). O MSI quantifica quanto os respectivos conjuntos de autovetores ou (*mode shapes*) calculados e estimados combinam, ou seja, faz um reconhecimento de padrões. O MSI é definido por:

$$MSI = \sum_{i=1}^{n_g} \left(\frac{\hat{\mathbf{v}}_{gi}^T \mathbf{v}_{gi} + \mathbf{v}_{gi}^T \hat{\mathbf{v}}_{gi}}{2n_g \mathbf{v}_{gi}^T \mathbf{v}_{gi}} \right)$$

A condição crítica é detectada se o autovalor identificado é pa-

recido com o previamente calculado e se

$$1 - \varepsilon < MSI < 1 + \varepsilon$$

onde ε é uma constante pré-definida.

O algoritmo de controle para chaveamento

O algoritmo de controle para chaveamento resume-se em:

1. Identifique os modos de oscilação e seus respectivos autovetores (*mode shapes*);
2. Calcule o índice MSI;
3. Se $\lambda_{\text{calculado}} \cong \lambda_{\text{identificado}}$ e $1 - \varepsilon < MSI < 1 + \varepsilon$, então chaveie o controlador central para a condição de projeto que amortece as oscilações críticas identificadas.

O método de projeto de controle utilizado para amortecer as oscilações na Seção 7.5.5 foi o de otimização não-convexa e não-suave, apresentado na Seção 7.2.3. Todos os controladores utilizados na Seção 7.5.5, ou seja PSSs, são do tipo dinâmicos, representados por funções de transferências de segunda ordem tais como:

$$PSS_{ij}(s) = \frac{s^2 + a.s + b}{s^2 + c.s + d}$$

7.5.5 Resultados

No processo de identificação, o método de Prony multi-sinais foi utilizado para estimar os autovalores, e os *mode shapes* associados as potências elétricas para diversas contingências no sistema.

Assume-se que todas as 5 máquinas do sistema têm suas respectivas potências elétricas medidas por um SMFS. Para a simulação, foi utilizado um passo de integração de 0,005 s e após detectado um *ringdown*, o processo de identificação é iniciado usando uma janela com duração de 5 s. Todos os sinais são filtrados e reamostrados de 200 Hz, que corresponde a frequência de amostragem para o passo de integração

usado, para uma frequência de 20 Hz, a fim de reduzir o custo computacional do processo de identificação pelo método de Prony multi-sinais.

Os resultados do processo de identificação (autovalores e resíduos) são ordenados pelo IDM [174], apresentado na Seção 5.3. Assim, é possível comparar os *mode shapes* identificados associados aos modos críticos com os previamente calculados através de linearização em um processo *off-line* e detectar a condição crítica para chavear o controle centralizado. Assume-se que este processo dure 500 ms.

Para o processo de identificação, os dados analisados foram obtidos a partir de simulações não-lineares devido a ocorrência de *ring-downs*. Para todos os resultados, o tamanho das janelas analisadas é de 5 s.

Para o caso base, os autovalores críticos identificados e os *mode shapes* são apresentados na Tabela 7.6. Os dados para o processo de identificação foram obtidos após um curto-circuito trifásico franco com duração de 50 ms na barra 5, Figura 7.2, sem abertura de linha. Os autovalores dominantes calculado e o identificado, assim como os *mode shapes* associados às potências elétricas são parecidos.

Tabela 7.6: Caso Base: Autovalores e Mode Shapes

Autovalores e Mode Shapes		Barra
Calculado	Identificado	
$\lambda = -0,33 \pm 5,21j$	$\lambda = -0,36 \pm 5,22j$	
$1\angle 0^\circ$	$1\angle 0^\circ$	7
$0,1736\angle 151,50^\circ$	$0,1819\angle 149,58^\circ$	4
$0,0932\angle -167,86^\circ$	$0,1063\angle -165,46^\circ$	3
$0,0874\angle -166,30^\circ$	$0,1004\angle -164,25^\circ$	1
$0,0644\angle -162,54^\circ$	$0,0731\angle -160,26^\circ$	2
Mode Shape Index (MSI)		1,1010

Embora os PSSs convencionais forneçam amortecimentos elevados ao sistema, existem configurações onde o amortecimento é reduzido consideravelmente. Duas das configurações que apresentam baixo amortecimento são consideradas nas análises: **Caso 1**, a perda de uma das três linhas de transmissão idênticas entre as barras 6 e o equivalente Sudeste (barra 7) e **Caso 2**, a perda da linha de transmissão que liga as barras 2 e 5.

Os resultados da identificação para o **Caso 1** é apresentado na Tabela 7.7. Os dados para o processo de identificação são obtidos pela aplicação de um curto-circuito trifásico franco com duração de 30 ms na barra 6, seguido da abertura de um dos três segmentos que ligam as barras 6 – 7. Esta caso resulta em amortecimento prati-

camente nulo. A discrepância entre o autovalor crítico, calculado pela linearização e o identificado pode ser explicado pelas não-linearidades consideradas no modelo durante a simulação não-linear.

Tabela 7.7: Caso 1: Autovalores e Mode Shapes

Autovalores e Mode Shapes		Barra
Calculado	Identificado	
$\lambda = +0,021 \pm 4,62j$	$\lambda = -0,014 \pm 4,36j$	
$1\angle 0^\circ$	$1\angle 0^\circ$	7
$0,2590\angle 124,39^\circ$	$0,2840\angle 115,37^\circ$	4
$0,0674\angle 179,62^\circ$	$0,0618\angle -167,00^\circ$	3
$0,0663\angle -178,05^\circ$	$0,0619\angle -164,47^\circ$	1
$0,0500\angle -174,18^\circ$	$0,0467\angle -160,65^\circ$	2
Mode Shape Index (MSI)		0,9588

Os autovalores críticos e os *mode shapes* de potência elétrica calculados e identificados para o **Caso 2** estão apresentados na Tabela 7.8. O amortecimento nesta situação é $\zeta = 3,36\%$. A simulação não-linear considera um curto-circuito trifásico franco com duração de 100 ms na barra 2, seguido da abertura da linha de transmissão que conecta as barras 2 – 5.

Tabela 7.8: Caso 2: Autovalores e Mode Shapes

Autovalores e Mode Shapes		Barra
Calculado	Identificado	
$\lambda = -0,165 \pm 4,89j$	$\lambda = -0,166 \pm 4,87j$	
$1\angle 0^\circ$	$1\angle 0^\circ$	7
$0,2184\angle 163,07^\circ$	$0,2468\angle 165,09^\circ$	4
$0,0690\angle 161,87^\circ$	$0,0707\angle 164,31^\circ$	3
$0,0651\angle 171,32^\circ$	$0,0674\angle 170,94^\circ$	1
$0,0505\angle 154,81^\circ$	$0,0556\angle 158,44^\circ$	2
Mode Shape Index (MSI)		0,9436

Um conjunto de parâmetros de controle foi projetado para cada uma das duas configurações, utilizando o método descrito nesta seção. O controlador central foi projetado considerando atrasos de 100 ms nos sinais de entrada e de 100 ms nos sinais de saída, totalizando 200 ms de atraso no sistema de transmissão de dados do SMFS para o concentrador de dados (PDC) e do PDC para os geradores.

Para o **Caso 1**, o controle projetado alterou os pólos dominantes do sistema de $\lambda = -0,014 \pm 4,36j$ para $\lambda = -0,67 \pm 4,79j$, com amortecimento de $\zeta = 13,8\%$.

Para o **Caso 2**, o controlador alterou as posições dos pólos de $\lambda = -0,165 \pm 4,89j$ para $\lambda = -0,4048 \pm 4,9403j$, com amortecimento

de $\zeta = 8,17\%$.

Os resultados das simulações não-lineares são apresentados para o processo de identificação seguido pelo efeito do chaveamento do controle *gain schedule*.

Simulações Não-lineares

Nas simulações, o chaveamento do controle para os controladores projetados via otimização não-convexa e não-suave ocorre 5,5 s após a detecção dos respectivos *ringdowns*. Isto corresponde à janelas de 5 s em que os dados são amostrados para serem usados no processo de identificação e os outros 500 ms correspondem ao tempo assumido para calcular os autovalores pelo método de Prony e o tempo de identificação da condição crítica de operação, totalizando os 5,5 s.

Um curto-circuito trifásico franco com duração de 100 ms é aplicado à barra 2, seguido da abertura da linha de transmissão que liga as barras 2 e 5. Esta situação corresponde ao **Caso 2**. As variações angulares dos geradores 2 e 4 em relação ao equivalente Sudeste estão mostradas na Figura 7.10 e na Figura 7.11, respectivamente. O algoritmo de controle para chaveamento indica que esta situação corresponde ao **Caso 2** e os parâmetros de controle mais indicados para esta situação são utilizados no controle centralizado (chaveamento) após 5,5 s. Após o chaveamento, o controle centralizado aumenta o amortecimento do sistema, melhorando o desempenho dinâmico do sistema.

Um segundo caso é analisado. Nesta situação, um curto-circuito trifásico franco com duração de 30 ms é aplicado na barra 6, seguido da abertura de uma das três linhas de transmissão que ligam as barras 6 e 7, o que corresponde ao **Caso 1**. As variações angulares dos geradores 1 e 4 em relação ao equivalente Sudeste estão mostradas na Figura 7.12 e na Figura 7.13, respectivamente. A condição operativa é identificada e ocorre o chaveamento do controle centralizado. Após o chaveamento para uma parametrização adequada do controle centralizado, o amortecimento é aumentado.

A robustez do controle centralizado é testada para o caso onde se perde um sinal remoto. Assumindo a perda do sinal de Itaipu, as variações angulares dos geradores 2 e 4 em relação ao equivalente Sudeste são apresentadas na Figura 7.14 e na Figura 7.15, respectivamente, para a mesma falta. As curvas pontilhadas correspondem ao sistema

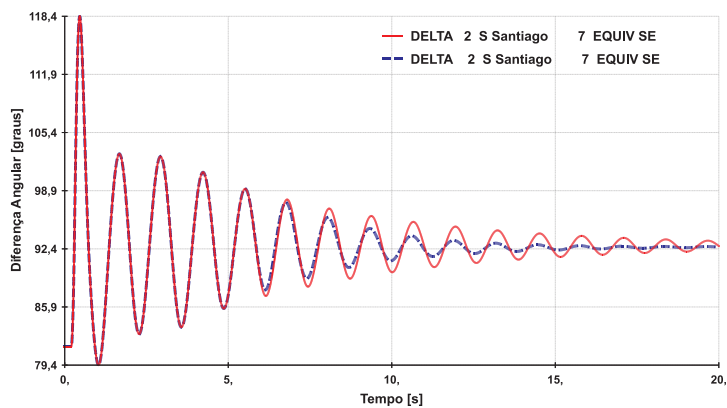


Figura 7.10: Variações Angulares do Gerador 2: perda da LT 2 – 5.

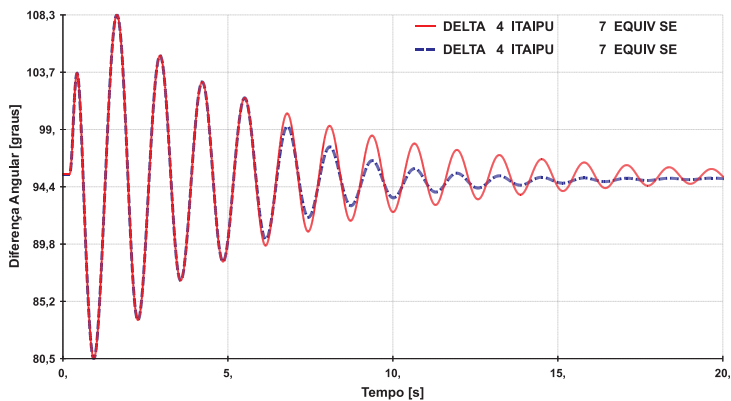


Figura 7.11: Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 2 – 5.

sem chaveamento do controle centralizado para uma condição apropriada, as curvas tracejadas correspondem aos casos onde há chaveamento e as curvas contínuas para os casos onde há chaveamento do controle central, porém com a perda do sinal remoto de Itaipu. Nota-se que mesmo com a perda do sinal, o sistema apresenta um amortecimento adequado.

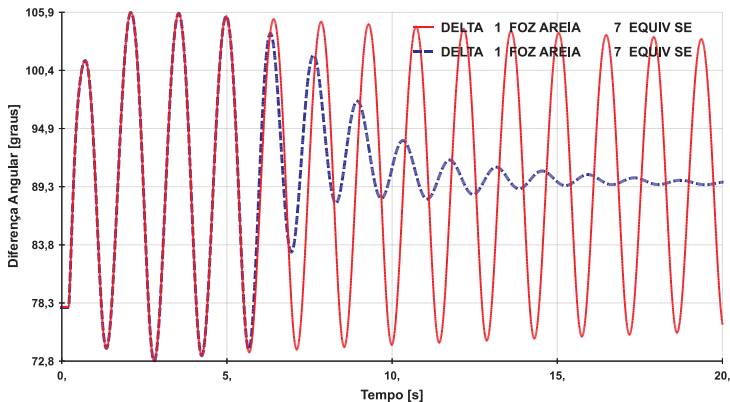


Figura 7.12: Variações Angulares do Gerador 1: perda da LT 6–7.

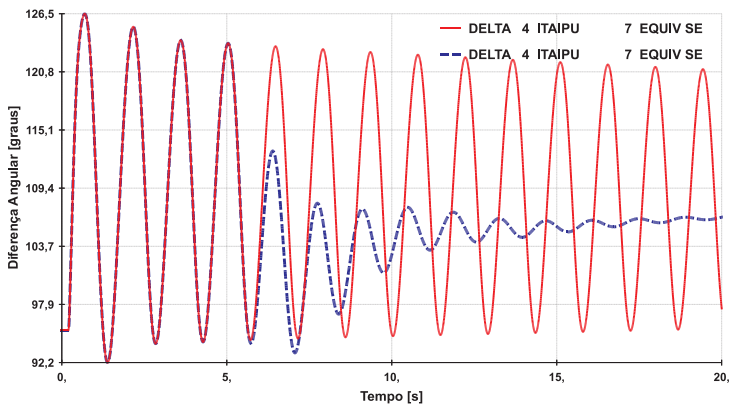


Figura 7.13: Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 6–7.

7.5.6 Comentários

Um método que combina identificação de sistemas e controle usando SMFS foi proposto a fim de amortecer oscilações eletromecânicas em tempo quase real. Neste trabalho o método de Prony multi-sinais foi utilizado para detectar os modos oscilatórios críticos e também

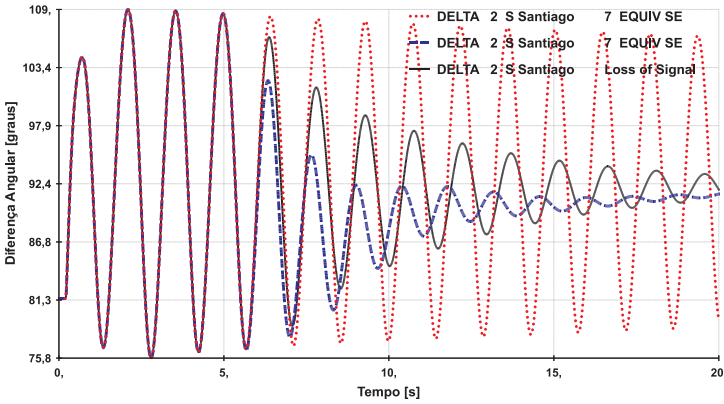


Figura 7.14: Variações Angulares do Gerador 2: perda da LT 6–7 e perda da LT 6–7 seguida pela perda do sinal de Itaipu.

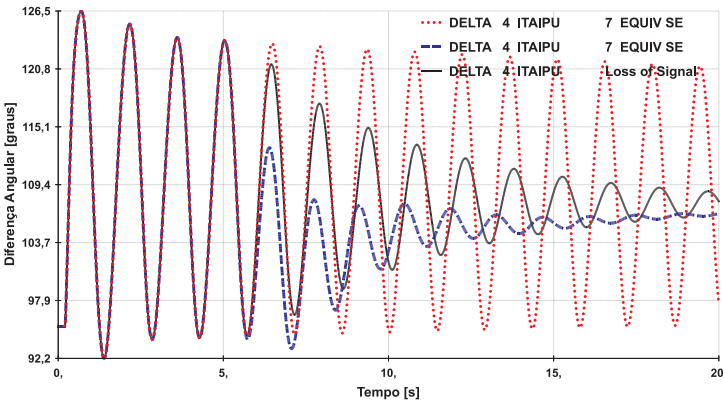


Figura 7.15: Variações Angulares do Gerador 4: perda da LT 6–7 e perda da LT 6–7 seguida pela perda do sinal de Itaipu.

os *mode shapes*, porém estas identificações também poderiam ter sido feitas utilizando outros métodos.

O uso do índice de *mode shapes* MSI utilizado nesta tese fornece uma indicação da configuração operativa do sistema, mas uma discriminação exata não é garantida para muitas condições operativas.

A precisão com que os padrões de *mode shape* refletem as condi-

ções operativas de um sistema é uma questão em aberto, necessitando portanto de mais pesquisas.

7.6 CONCLUSÕES

O uso de sinais de SMFS pode ser empregado como sinais de realimentação em controladores centralizados e descentralizados com a finalidade de amortecimento de oscilações eletromecânicas.

A aplicação das técnicas de controle ótimo com e sem restrições estruturais em conjunto com o *método proposto de cálculo de variáveis de estado não mensuráveis* apresentam bons resultados quando se observam os autovalores em malha fechada. Nas simulações não-lineares com os controladores propostos, nota-se um maior amortecimento se comparado às respostas de controladores convencionais, mas esta abordagem de projeto não é robusta a mudanças estruturais no sistema.

O maior problema em relação a estes fatos parece estar relacionado ao sistema de referência síncrona usado na modelagem do controle e ainda deve ser revisto.

Para tentar solucionar estes problemas, deve ser estudada uma formulação referenciando o sistema em relação ao seu Centro de Ângulo (COA¹⁴), onde a referência é variante, ao invés do uso de uma referência síncrona comum que pode gerar tendências (desvios) em variáveis a serem usadas no controle.

Os testes realizados nesta seção mostraram que modos de oscilação e padrões de *mode shape* podem ser identificados em intervalos de tempo que ainda permitem que ações de controle possam ser tomadas, porém testes devem ser efetuados em sistemas de grande porte. Estes resultados preliminares indicam que os SMFS aliados a técnicas de identificação de sistemas e de controle podem ser utilizados para complementar os esquemas de controle atualmente utilizados em sistemas elétricos de potência.

No próximo capítulo, as conclusões do trabalho são apresentadas e trabalhos futuros são sugeridos.

PGELT_EX.

¹⁴Center of Angle ou Centro de Inércia - Center of Inertia (COI).

8 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste documento foram abordados os temas de detecção e controle de modos eletromecânicos e controle aplicado a sistemas elétricos de potência.

O método de Prony e sua extensão, o método de Prony multi-sinais, foram utilizados para detectar modos durante períodos transitórios. Na utilização do método de Prony multi-sinais é possível fazer uso conjunto com o IDM e a partir de um único conjunto de autovaleiros, detectar quais deles são mais dominantes em cada um dos sinais analisados simultaneamente.

A teoria de métodos de identificação de subespaço de espaço de estados, que possibilita a identificação de sistemas diretamente na forma de equações de estado a partir de dados de entrada e saída ou apenas de saída, foi apresentada. Por serem algoritmos capazes de lidar com múltiplos sinais, sistemas MIMO, se basearem em métodos de álgebra linear numérica e utilizarem ferramentas numéricas robustas, são métodos adequados para monitoração contínua de modos. O N4SID foi o algoritmo escolhido para realizar a monitoração contínua de sistemas.

Para que a monitoração contínua pudesse ser realizada de forma automática, foi necessário *propor* um algoritmo de rastreamento de modos. O algoritmo proposto é composto pelo N4SID e por um índice de dominância modal, que compõem o ASRAM (Algoritmo de Subespaço para Rastreamento Automático de Modos). Foi *proposta* uma modelagem de carga dinâmica que possui parcelas que variam aleatoriamente no programa ANATEM. A partir desta modelagem de carga, foi possível reproduzir os efeitos dos dados de ambiente em modelos não-lineares de sistemas elétricos de potência e testar o ASRAM.

O desempenho do ASRAM foi testado e comparado na detecção de modos de modelos lineares e não-lineares com variações aleatórias de carga em um sistema teste. Os resultados, para a região em torno do ponto de operação avaliado, sugerem que as simulações em modelos não-lineares podem ser substituídas pelas que consideram o modelo linearizado. Testes de rastreamento modal não foram realizados quando o modelo não-linear estava operando em situações onde algumas de suas variáveis de estado estavam bem próximas a seus respectivos limites de saturação. Estas saturações são representadas por limites superiores e inferiores de blocos limitadores que compõem seus diversos controlado-

res. Isto poderia originar oscilações que não podem ser reproduzidas quando se considera o modelo linear, além de interferir no processo de rastreamento modal de forma imprevisível.

Para analisar principalmente oscilações não-estacionárias e não-lineares, foram utilizados a Transformada de Hilbert (TH) e o Operador de Energia de Teager-Kaiser (TKEO) em conjunto com a Decomposição Modal Empírica (EMD). A utilização da EMD em conjunto com a TH e o TKEO, está sendo chamada de Transformada de Hilbert-Huang (THH) e Transformada de Teager-Huang (TTH), respectivamente.

Foi *proposta* uma extensão para calcular o amortecimento instantâneo utilizando as grandezas amplitude e frequência instantâneas fornecidas pelo TKEO. Foi demonstrado que o coeficiente de amortecimento instantâneo *proposto* é bastante similar ao amplamente utilizado para mesma finalidade quando se aplica a TH. A diferença é que a equação *proposta* considera variações de frequência instantânea com peso duas vezes maior que a utilizada na TH, fato que teoricamente ajuda no rastreamento de sinais não-estacionários.

Quando a EMD e a EEMD são utilizadas para decompor um sinal multi-modal em vários unimodais, surgem os “*end effects*”, que têm grande influência principalmente no cálculo do amortecimento instantâneo. Estes efeitos são menos prejudiciais aos cálculos quando a duração das oscilações são maiores, ou seja quando o amortecimento é baixo. Para utilização em oscilações com amortecimento elevado, é necessário empregar técnicas capazes de minimizar seu efeitos.

Na segunda parte do trabalho, foram estudadas técnicas de controle multivariável com realimentação de saída. Nos controladores projetados foram utilizados sinais de realimentação locais e remotos, isto só é possível de ser realizado devido à existência de SMFS.

Técnicas de controle ótimo (LQR) com e sem restrições estruturais e o uso de Inequações Matriciais Lineares (LMIs) foram utilizadas. Na formulação do problema para a síntese de controladores via LMIs, foram consideradas as modelagem de sistemas na forma convencional de espaço de estados e também na forma de sistemas descritores. O uso de sistemas descritores apresenta vantagens em relação aos sistemas na forma de espaço de estados, principalmente no quesito de modelagem de incertezas. Por outro lado a dimensão do problema é bastante aumentada, transformando o projeto de controladores utilizando a formulação de sistemas descritores em um problema *N-P hard*. Desta forma os algoritmos utilizados para resolver as LMIs só forneceram respostas

viáveis para sistemas com ordens inferiores a 30 estados, inviabilizando a aplicação de LMIs para a obtenção de controladores considerando sistemas descritores mesmo em sistemas elétricos de potência de pequeno porte.

Também foram utilizados métodos de otimização não-convexa a fim de projetar controladores multivariáveis. Com esta abordagem foi possível projetar controladores com escolha prévia de ordem, definida pelo usuário. Isto possibilita a obtenção de controladores que podem ter estrutura que variam desde simples ganhos até polinômios de ordem n com a presença de zeros e pólos.

Como os dados são amostrados pelos SMFS, é necessário considerar a modelagem de atrasos causados pelo tempo de transmissão de dados no instante de projeto dos controladores. Esta tarefa foi realizada e os resultados foram bons.

A determinação de autovetores à direita ou *mode shape* a partir de métodos de identificação foi explorada e as informações serviram para dar informações sobre o modo em que máquinas do sistema estão oscilando umas contra as outras. Desta forma foi possível utilizar um controle do tipo *Gain Scheduling* (GS), onde as informações fornecidas pelos autovalores em conjunto com os autovetores detectados possibilitou melhorar o desempenho dinâmico do sistema.

8.1 PROPOSTAS PARA O PROSSEGUIMENTO DA PESQUISA

Nesta tese, foram aplicados alguns dos métodos considerados como os mais promissores e avançados para analisar oscilações, como métodos de Prony multi-sinais, subespaço de estados, Transformada de Hilbert, o operador de energia de Teager-Kaiser e as decomposições modais empíricas. Dentre os métodos promissores, pode-se citar também as Transformadas Wavelet, que não foram utilizadas nesta tese para a detecção de modos eletromecânicos. Resultados recentes [60] compararam o desempenho de métodos de subespaço, *Independent (Principal) Component Analysis* e as Transformadas Wavelet no processo de rastreamento modal em sinais sujeitos a variações aleatórias de carga (dados de ambiente). As conclusões referentes às comparações destes três métodos foi que todos eles apresentam comportamentos similares ao se analisar dados com elevada energia modal, porém quando a energia modal é baixa e os ruídos não são Gaussianos, espera-se que o desempenho

de métodos de subespaço seja superior ao dos outros dois métodos.

A partir dos resultados obtidos em capítulos anteriores desta tese e baseando-se em diversas publicações relacionadas à análises de oscilações, pode-se afirmar que os maiores desafios estão relacionados à identificação de sinais estocásticos e de sinais não-lineares, como mencionado em [136]. Assim há urgência de desenvolvimento de novas ferramentas para análise de oscilações [136], pois as existentes não são capazes de fornecer bons resultados em determinadas situações. Estes fatos confirmam a complexidade do problema e as dificuldades enfrentadas no decorrer deste trabalho de doutorado.

Em relação às aplicações em controle, que utilizam realimentação de variáveis de estado e algébricas pode-se considerar fazer a modelagem do sistema de potência via formulação com referência no Centro de Ângulo. Esta abordagem visa eliminar tendências que surgem durante a simulação não-linear nos sinais de controle. As tendências são mais acentuadas quando ocorrem grandes perturbações e mudanças estruturais no sistema, que levam o mesmo a operar em outro ponto de operação fazendo com que surjam desvios permanentes em variáveis do SMFS usadas na realimentação *estática* do sistema de controle.

A questão de controle baseado na identificação em tempo quase real de modos eletromecânicos de sistemas foi explorada, mas ainda é uma questão em aberto, pois depende que a detecção dos modos seja feita com exatidão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KUNDUR, P. et al. Definition and classification of power system stability iee/cigre joint task force on stability terms and definitions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 3, p. 1387–1401, Aug. 2004. ISSN 1558-0679.
- [2] PRIOSTE, F. B.; SILVA, A. S. e. Power system small-signal stability improvement by feedback of state and algebraic variables. *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, p. 361–366, July 2007.
- [3] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 1994. 1176 p.
- [4] SAUER, P. W.; PAI, M. A. *Power System Dynamics and Stability*. USA: Prentice Hall, 1997. 357 p.
- [5] COBB, D. Descriptor variable systems and optimal state regulation. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 28, n. 5, p. 601–611, May 1983. ISSN 0018-9286.
- [6] MASUBUCHI, I. et al. H_∞ control for descriptor systems: a matrix inequalities approach. *Automatica*, Pergamon Press, Inc., Tarrytown, NY, USA, v. 33, n. 4, p. 669–673, 1997. ISSN 0005-1098.
- [7] PAI, M. A. *Power System Stability: Analysis by the Direct Method of Lyapunov*. USA: Elsevier, 1981. 251 p.
- [8] PEREZ-ARRIAGA, I.; VERGHESE, G.; SCHWEPPE, F. Selective modal analysis with applications to electric power systems, part i: Heuristic introduction. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 9, p. 3117–3125, Sept. 1982. ISSN 0018-9510.
- [9] VERGHESE, G.; PEREZ-ARRIAGA, I.; SCHWEPPE, F. Selective modal analysis with applications to electric power systems, part ii: The dynamic stability problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 9, p. 3126–3134, Sept. 1982. ISSN 0018-9510.

- [10] DEMELLO, F.; CONCORDIA, C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 4, p. 316–329, April 1969. ISSN 0018-9510.
- [11] HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New Jersey, USA: Wiley-IEEE Press, 1999. 452 p.
- [12] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. History and applications of phasor measurements. *PSCE - Power System Conference and Exposition*, USA, p. 331–335, 2006.
- [13] PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements a historical overview. USA, p. 476–479, 2002.
- [14] GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. *Power System Analysis*. New York, USA: McGraw-Hill, Inc., 1994. 787 p.
- [15] ROBBA, E. et al. *Introdução a Sistemas Elétrico de Potência*. São Paulo, Brasil: Edgard Blucher, 1996. 472 p.
- [16] IEEE. *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*. C37.118-2005. New York, USA, 2005.
- [17] WU, J. New implementations of wide area monitoring system in power grid of china. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, China, p. 1–7, 2005.
- [18] E., H. K.; T., H. G.; NI, H. Use of satellite technologies for power system measurements, command, and control. *Proceedings of the IEEE - Invited Paper*, USA, v. 93, n. 5, p. 947–955, May 2005.
- [19] STAHLHUT, J. et al. Latency viewed as a stochastic process and its impact on wide area power system control signals. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 1, p. 84–91, Feb. 2008. ISSN 1558-0679.
- [20] MCARTHUR, S. et al. Multi-agent systems for power engineering applications-part i: Concepts, approaches, and technical challenges. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4, p. 1743–1752, Nov. 2007. ISSN 1558-0679.

- [21] MCARTHUR, S. et al. Multi-agent systems for power engineering applications-part ii: Technologies, standards, and tools for building multi-agent systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4, p. 1753–1759, Nov. 2007. ISSN 1558-0679.
- [22] IEEE. *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*. C37.111-1999. New York, USA, 1999.
- [23] DECKER, I. C. et al. Experience and Applications of Phasor Measurements to the Brazilian Interconnected Power System. *European Transactions on Electrical Power*, John Wiley and Sons, Ltd., 2010. ISSN 1546-3109. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/etep.537>>.
- [24] RUIZ-VEGA, D.; MESSINA, A.; PAVELLA, M. Online assessment and control of transient oscillations damping. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 2, p. 1038–1047, May 2004. ISSN 1558-0679.
- [25] TAYLOR, C. et al. Wacs wide area stability and voltage control system: RD and online demonstration. *Proceedings of the IEEE*, v. 93, n. 5, p. 892–906, May 2005. ISSN 0018-9219.
- [26] WU, J. et al. Dynamic monitoring and control system based on synchronized phasor measurement in heilongjian eastern power system. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, v. 3, p. 1689–1693 vol.3, Jan 2000.
- [27] RESTREPO, J. Q. *A Real-Time Wide-Area Control for Mitigating Small-Signal Instability in Large electric Power systems*. Tese (Doutorado) — Washington State university.
- [28] ZHOU, N. et al. Robust rls methods for online estimation of power system electromechanical modes. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 3, p. 1240–1249, Aug. 2007. ISSN 1558-0679.
- [29] HAUER, J.; DEMEURE, C.; SCHARF, L. Initial results in pronny analysis of power system response signals. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 5, n. 1, p. 80–89, Feb 1990. ISSN 1558-0679.

- [30] PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D.; DONNELLY, M. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 3, p. 1245–1251, Aug 1997. ISSN 1558-0679.
- [31] OVERSCHEE, P. V.; MOOR, B. D. *Subspace Identification for Linear Systems, Theory - Implementation - Applications*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996. 268 p.
- [32] WIES, R. W.; PIERRE, J. W.; TRUDNOWSKI, D. J. Use of arma block processing for estimating stationary low-frequency electromechanical modes of power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 18, n. 1, p. 167–173, Feb. 2003.
- [33] ANDERSON, M. et al. Bootstrap-based confidence interval estimates for electromechanical modes from multiple output analysis of measured ambient data. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 2, p. 943–950, May 2005. ISSN 1558-0679.
- [34] ZHOU, N.; PIERRE, J.; HAUER, J. Initial results in power system identification from injected probing signals using a subspace method. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 3, p. 1296–1302, Aug. 2006. ISSN 1558-0679.
- [35] GHASEMI, H.; CANIZARES, C.; MOSHREF, A. Oscillatory stability limit prediction using stochastic subspace identification. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 2, p. 736–745, May 2006. ISSN 1558-0679.
- [36] WIES, R.; PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D. Use of least mean squares (lms) adaptive filtering technique for estimating low-frequency electromechanical modes in power systems. *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, p. 1863–1870 Vol.2, June 2004.
- [37] WIES, R. W.; BALASUBRAMANIAN, A.; PIERRE, J. W. Adaptive filtering techniques for estimating electromechanical modes in power systems. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 1–8, June 2007. ISSN 1932-5517.
- [38] EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. *An Introduction to the Bootstrap*. Boca Raton, FL, USA: Chapman and Hall/CRC, 1994. 456 p.

- [39] GOOD, P. *Permutation, Parametric, and Bootstrap Tests of Hypotheses*. New York, USA: Springer; 3rd edition, 2004. 376 p.
- [40] GHASEMI, H.; CANIZARES, C. Confidence intervals estimation in the identification of electromechanical modes from ambient noise. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 2, p. 641–648, May 2008. ISSN 0885-8950.
- [41] LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User (2nd Edition)*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999. 672 p.
- [42] KATAYAMA, T. *Subspace Methods for System Identification (Communications and Control Engineering)*. Leipzig, Germany: SPRINGER, 2005. 392 p.
- [43] ZHOU, N.; PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D. A bootstrap method for statistical power system mode estimation and probing signal selection. *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, p. 172–178, 29 2006-Nov. 1 2006.
- [44] TRUDNOWSKI, D. et al. Performance of three mode-meter block-processing algorithms for automated dynamic stability assessment. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 2, p. 680–690, May 2008. ISSN 0885-8950.
- [45] STOICA, P.; MOSES, R. L. *Introduction to Spectral Analysis*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1997. 319 p.
- [46] HUANG, N. e. a. The empirical mode decomposition and the hilbert spectrumfor nonlinear and non-stationary time series. *Proc. Royal Society*, v. 454, p. 903–995, 1998.
- [47] POON, K.-P.; LEE, K.-C. Analysis of transient stability swings in large interconnected power systems by fourier transformation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 3, n. 4, p. 1573–1581, Nov 1988. ISSN 1558-0679.
- [48] O'SHEA, P. The use of sliding spectral windows for parameter estimation in power system disturbance monitoring. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 4, p. 1261–1267, Nov 2000. ISSN 1558-0679.

- [49] KAKIMOTO, N. et al. Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 1, p. 260–268, Feb. 2006. ISSN 1558-0679.
- [50] HASHIGUCHI, T.; AL et. Analysis os generator oscillation characteristics based on multiple synchronized phasor measurements. *Power Energy, IEEJ Transactions on*, v. 123, n. 12, p. 1471–1477, Dec. 2003.
- [51] YANG, J.-Z.; LIU, C.-W.; WU, W.-G. A hybrid method for the estimation of power system low-frequency oscillation parameters. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4, p. 2115–2123, Nov. 2007. ISSN 1558-0679.
- [52] RIOUL, O.; VETTERLI, M. Wavelets and signal processing. *Signal Processing Magazine, IEEE*, v. 8, n. 4, p. 14–38, Oct 1991. ISSN 1053-5888.
- [53] ROBERTSON, D. et al. Wavelets and electromagnetic power system transients. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 11, n. 2, p. 1050–1058, Apr 1996. ISSN 0885-8977.
- [54] DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. USA: SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 377 p.
- [55] GALLI, A.; HEYDT, G.; RIBEIRO, P. Exploring the power of wavelet analysis. *Computer Applications in Power, IEEE*, v. 9, n. 4, p. 37–41, Oct 1996. ISSN 0895-0156.
- [56] MEUNIER, M.; BROUAYE, F. Fourier transform, wavelets, prony analysis: tools for harmonics and quality of power. *Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on*, v. 1, p. 71–76 vol.1, Oct 1998.
- [57] MEI, K.; ROVNYAK, S.; ONG, C.-M. Dynamic event detection using wavelet analysis. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, p. 7 pp.–, June 2006.
- [58] BRUNO, S.; BENEDICTIS, M. D.; SCALA, M. L. "taking the pulse" of power systems: Monitoring oscillations by wavelet analysis and wide area measurement system. *Power Systems*

- Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*, p. 436–443, 29 2006–Nov. 1 2006.
- [59] BRENNER, M. J.; LIND, R. On-line robust modal stability prediction using wavelet processing. *Technical Memorandum - NASA Dryden Flight Research Center, Edwards, CA*, NASA-TM-1998-206550, p. 19, September 1998.
- [60] TURUNEN, J. et al. Comparison of three electromechanical oscillation damping estimation methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, PP, n. 99, p. 1, 2011. ISSN 0885-8950.
- [61] MESSINA, A.; VITTAL, V. Nonlinear, non-stationary analysis of interarea oscillations via hilbert spectral analysis. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 3, p. 1234–1241, Aug. 2006. ISSN 1558-0679.
- [62] MESSINA, A. et al. Interpretation and visualization of wide-area pmu measurements using hilbert analysis. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 21, n. 4, p. 1763–1771, Nov. 2006. ISSN 1558-0679.
- [63] MESSINA, A.; VITTAL, V. Extraction of dynamic patterns from wide-area measurements using empirical orthogonal functions. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 2, p. 682–692, May 2007. ISSN 1558-0679.
- [64] SNYDER, A. et al. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements. *Power System Technology, 1998. Proceedings. POWERCON '98. 1998 International Conference on*, v. 2, p. 790–794 vol.2, Aug 1998.
- [65] SNYDER, A. et al. A robust damping controller for power systems using linear matrix inequalities. *Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, IEEE*, v. 1, p. 519–524 vol.1, Jan-4 Feb 1999.
- [66] BOYD, S. et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. SIAM, 1994. 193 p. Disponível em: <http://www.stanford.edu/~boyd/LMIbackslash_sys_ctrl.html>.

- [67] ZHOU, K. et al. *Robust and Optimal Control*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1995. 596 p.
- [68] MEKKI, K. et al. Damping controller input-signal loss effects on the wide-area stability of an interconnected power system. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*, v. 2, p. 1015–1019 vol. 2, 2000.
- [69] YUAN, Y.; SUN, Y. Effect of delayed input on wide area optimal control and design of compensation. *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, p. 1–4, Oct. 2006.
- [70] ZHONG, Q.-C. *Robust Control of Time-delay Systems*. London, UK: Springer, 2006. 231 p.
- [71] MAJUMDER, R. et al. A unified smith predictor approach for power system damping control design using remote signals. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 13, n. 6, p. 1063–1068, Nov. 2005. ISSN 1558-0865.
- [72] DULLERUD, G. E.; PAGANINI, F. *A Course in Robust Control Theory*. New York, USA: Springer, 2005. 440 p.
- [73] CHILALI, M.; GAHINET, P. H^∞ design with pole placement constraints: an LMI approach. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 41, n. 3, p. 358–367, Mar 1996. ISSN 0018-9286.
- [74] CHILALI, M.; GAHINET, P.; APKARIAN, P. Robust pole placement in lmi regions. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, v. 44, n. 12, p. 2257–2270, Dec 1999. ISSN 0018-9286.
- [75] GU, P. H. P. D.-W.; KONSTANTINOV, M. M. *Robust Control Design with Matlab*. London, UK: Springer, 2005.
- [76] KAMWA, I.; GRONDIN, R.; HEBERT, Y. Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems-a decentralized/hierarchical approach. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 16, n. 1, p. 136–153, Feb 2001. ISSN 1558-0679.
- [77] BRUNO, S.; BENEDICTIS, M. D.; SCALA, M. L. Integrating dynamic optimization methodologies with wams technologies. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 1–8, June 2007. ISSN 1932-5517.

- [78] CHAUDHURI, B.; MAJUMDER, R.; PAL, B. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 4, p. 1971–1979, Nov. 2004. ISSN 1558-0679.
- [79] HU, Z. H_∞ control of inter-area oscillations based on wams considering signals transmission delay. *Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on*, p. 1453–1458, May 2007.
- [80] WU, H.; TSAKALIS, K.; HEYDT, G. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 19, n. 4, p. 1935–1941, Nov. 2004. ISSN 1558-0679.
- [81] NI, H.; HEYDT, G.; MILI, L. Power system stability agents using robust wide area control. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 17, n. 4, p. 1123–1131, Nov 2002. ISSN 1558-0679.
- [82] HU, Z. Wams based robust stability control of multi-machine systems via lmi approach. *Industrial Electronics and Applications, 2007. ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on*, p. 2483–2488, May 2007.
- [83] YU, G. L. et al. Wide-area measurement-based nonlinear robust control of power system considering signals' delay and incompleteness. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 1–8, June 2007. ISSN 1932-5517.
- [84] CHAUDHURI, B.; PAL, B. Robust damping of inter-area oscillations through controllable phase shifters using global signals. *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, v. 3, p. 1673–1679 Vol. 3, July 2003.
- [85] XIE, X. et al. Inter-area damping control of statcom using wide-area measurements. *Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004). Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, v. 1, p. 222–227 Vol.1, April 2004.
- [86] DOTTA, D.; SILVA, A. S. e.; DECKER, I. C. Power system small-signal angular stability enhancement using synchronized

- phasor measurements. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 1–8, June 2007. ISSN 1932-5517.
- [87] ZOLOTAS, A. C. et al. A study on lqg/ltr control for damping inter-area oscillations in power systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 15, n. 1, p. 151–160, Jan. 2007. ISSN 1558-0865.
- [88] CHANG, Y. et al. Design of hvdc supplementary controller accommodating time delay of the wams signal in multi-machine system. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, p. 7 pp.–, June 2006.
- [89] HUANG, Y.; XU, Z. Hvdv supplementary controller based on synchronized phasor measurement units. *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*, p. 668–672 vol.2, Oct. 2004.
- [90] OKOU, F.; DESSAINT, L.-A.; AKHRIF, O. Power systems stability enhancement using a wide-area signals based hierarchical controller. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 20, n. 3, p. 1465–1477, Aug. 2005. ISSN 1558-0679.
- [91] HENICHE, A.; KAMWA, I. Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 2, p. 572–581, May 2008. ISSN 0885-8950.
- [92] HAUER, J. F.; TRUDNOWSKI, D. J.; DESTEESE, J. G. A perspective on wams analysis tools for tracking of oscillatory dynamics. *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, p. 1–10, June 2007. ISSN 1932-5517.
- [93] WEISS, L.; MCDONOUGH, R. N. Prony’s method, z-transforms, and pade approximation. *SIAM Review*, USA, v. 5, n. 2, p. 145–149, Apr. 1963.
- [94] BREZINSKI, C.; ISEGHEM, J. V. *Handbook of Numerical Analysis, Vol. III*. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157086590580016X>: Elsevier Science, 1994. 778 p.

- [95] ZIVANOVIC, R.; SCHEGNER, P. Pre-filtering improves prony analysis of disturbance records. *Developments in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference on*, v. 2, p. 780–783 Vol.2, April 2004. ISSN 0537-9989.
- [96] ZHANG, S.; XIE, X.; WU, J. Wams based detection and early-warning of low-frequency oscillations in large-scale power systems. *Electric Power Systems Research*, v. 5, p. 897–906, May 2008.
- [97] TRUDNOWSKI, D.; JOHNSON, J.; HAUER, J. Simo system identification from measured ringdowns. *American Control Conference, 1998. Proceedings of the 1998*, v. 5, p. 2968–2972 vol.5, Jun 1998.
- [98] TRUDNOWSKI, D.; JOHNSON, J.; HAUER, J. Making prony analysis more accurate using multiple signals. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 1, p. 226–231, Feb 1999. ISSN 1558-0679.
- [99] AGUIRRE, L. A. *Introdução À Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004. - p.
- [100] PRIOSTE, F. B.; SILVA, A. S.; DECKER, I. C. Identificação de Oscilações Eletromecânicas a partir de Dados de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada. *Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission*, p. 1–9, October 2009,.
- [101] HO B, L.; KALMAN, R. E. Efficient construction of linear state variables models from input/output functions. *Regelungstechnik*, v. 14, p. 545–548, 1966.
- [102] GUSTAFSSON, T. Instrumental variable subspace tracking using projection approximation. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 46, n. 3, p. 669 –681, mar 1998. ISSN 1053-587X.
- [103] COCK, K. D.; MERCÈRE, G.; MOOR, B. D. *Recursive subspace identification for in-flight modal analysis of airplanes*.
- [104] GOETHALS, I. et al. Recursive output only subspace identification for in-flight flutter monitoring. In: *Proceedings of*

- the 22nd International Modal Analysis Conference (IMACXXII.* [S.l.: s.n.], 2004.
- [105] QIN, S. J. An overview of subspace identification. *Computers and Chemical Engineering*, v. 30, n. 10-12, p. 1502 – 1513, 2006. ISSN 0098-1354. Papers form Chemical Process Control VII - CPC VII. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009813540600158X>>.
- [106] KAILATH, T. *Linear Systems*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1980. 682 p.
- [107] J., C.; T., F. Variable frequency electric circuit theory. *Bell System Technical Journal*,, v. 16, p. 513 –540, may 1937.
- [108] BOASHASH, B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. i. fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 4, p. 520 –538, apr 1992. ISSN 0018-9219.
- [109] BOASHASH, B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal. ii. algorithms and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 80, n. 4, p. 540 –568, apr 1992. ISSN 0018-9219.
- [110] POL, B. van der. The fundamental principles of frequency modulation. *Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering, Journal of the Institution of*, v. 93, n. 23, p. 153 –158, may 1946.
- [111] GABOR, D. Theory of communication. *Electrical Engineers - Part I: General, Journal of the Institution of*, v. 94, n. 73, p. 58, january 1947.
- [112] VILLE, J. Theorie et application de la notion de signal analytic. *Translation by I. Selin, Theory and applications of the notion of complex signal, Report T-92, RAND Corporation, Santa Monica, CA*, v. 2A, n. 1, p. 13, 1948.
- [113] BOASHASH, B. *Time Frequency Signal Analysis and Processing - A Comprehensive Reference*. Kidlington, Oxford, UK: Elsevier Science, 2003. 770 p.
- [114] KING, F. W. *Hilbert Transforms, Volume 1*. New York, USA: Encyclopedia of Mathematics and its Applications (No. 124), 2009. 896 p.

- [115] KING, F. W. *Hilbert Transforms, Volume 2*. New York, USA: Encyclopedia of Mathematics and its Applications (No. 125), 2009. 698 p.
- [116] FELDMAN, M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform–i. Free vibration analysis method 'Freevib'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 8, n. 2, p. 119 – 127, 1994. ISSN 0888-3270. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327084710119>>
- [117] FELDMAN, M. Non-linear system vibration analysis using Hilbert transform–ii. Forced vibration analysis method 'Forcevib'. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 8, n. 3, p. 309 – 318, 1994. ISSN 0888-3270. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327084710235>>
- [118] KAMWA, I.; PRADHAN, A.; JOOS, G. Robust detection and analysis of power system oscillations using the Teager-Kaiser Energy Operator. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 26, n. 1, p. 323 – 333, feb. 2011. ISSN 0885-8950.
- [119] JUANG, J.; PAPP, R. S. An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, v. 8, n. 5, p. 620–627, Feb. 1985.
- [120] TEAGER, S. M. T. H. M. A phenomenological model for vowel production in the vocal tract. In *Speech Science: Recent Advances (1985)*, pp. 73-109., p. 73 – 109, 1985.
- [121] TEAGER, S. M. T. H. M. Evidence for nonlinear sound production mechanisms in the vocal tract. *Kluwer Acad. Publ. (1990)*, p. 241 – 261, 1990.
- [122] KAISER, J. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. ICASSP-90., 1990 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1990. p. 381 – 384 vol.1. ISSN 1520-6149.
- [123] MARAGOS, P.; KAISER, J.; QUATIERI, T. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 41, n. 10, p. 3024 – 3051, oct 1993. ISSN 1053-587X.

- [124] MARAGOS, P.; KAISER, J.; QUATIERI, T. On amplitude and frequency demodulation using energy operators. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 41, n. 4, p. 1532 –1550, apr 1993. ISSN 1053-587X.
- [125] NUSSENZWEIG, H. M. *Curso de Física Básica, Volume 1 (Mecânica)(Quarta Edição)*. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 2002. 344 p.
- [126] NUSSENZWEIG, H. M. *Curso de Física Básica, Volume 2 (Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor)(Quarta Edição)*. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 2002. 314 p.
- [127] LANDAU, L. D.; LIFSHITZ, E. M. *Mechanics, Volume 1 (Course of Theoretical Physics)(3rd Edition)*. India: Butterworth-Heinemann, 1976. 224 p.
- [128] ARYA, A. P. *Introduction to Classical Mechanics, (2nd Edition)*. Reading, MA, USA: Benjamin Cummings, 1997. 712 p.
- [129] KAISER, J. Some useful properties of Teager’s energy operators. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1993. ICASSP-93., 1993 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1993. v. 3, p. 149 –152 vol.3. ISSN 1520-6149.
- [130] LAILA, D.; MESSINA, A.; PAL, B. A refined Hilbert-Huang transform with applications to interarea oscillation monitoring. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 2, p. 610 –620, may 2009. ISSN 0885-8950.
- [131] MESSINA, A. R. *Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective*. New York, USA: Springer, 2009. 289 p.
- [132] BEDROSIAN, E. The analytic signal representation of modulated waveforms. *Proceedings of the IRE*, v. 50, n. 10, p. 2071 –2076, oct. 1962. ISSN 0096-8390.
- [133] BEDROSIAN, E. A product theorem for hilbert transforms. *Proceedings of the IEEE*, v. 51, n. 5, p. 868 – 869, may 1963. ISSN 0018-9219.

- [134] NUTTALL, A.; BEDROSIAN, E. On the quadrature approximation to the hilbert transform of modulated signals. *Proceedings of the IEEE*, v. 54, n. 10, p. 1458 – 1459, oct. 1966. ISSN 0018-9219.
- [135] YAN, R.; GAO, R. Ieee instrumentation measurement magazine. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 10, n. 5, p. 40 – 45, 2007. ISSN 10946969.
- [136] HUANG, N. E.; ATTOH-OKINE, N. O. *The Hilbert-Huang Transform in Engineering*. Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis, 2005. 328 p.
- [137] BOVIK, A.; MARAGOS, P.; QUATIERI, T. Am-fm energy detection and separation in noise using multiband energy operators. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 41, n. 12, p. 3245 – 3265, dec 1993. ISSN 1053-587X.
- [138] EVANGELOPOULOS, G.; MARAGOS, P. Multiband modulation energy tracking for noisy speech detection. *Audio, Speech, and Language Processing, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 6, p. 2024 – 2038, nov. 2006. ISSN 1558-7916.
- [139] VIHOLAINEN, A.; ALHAVA, J.; RENFORS, M. Efficient implementation of complex modulated filter banks using cosine and sine modulated filter banks. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing, Hindawi Publishing Corporation*, v. 2006, p. 1–10, nov. 2006.
- [140] RIFE, D.; VINCENT, G. Use of the discrete Fourier transform in the measurement of frequencies and level tones. *Bell Syst. Tech. Journal*, v. 49, n. 2, p. 197–228, Feb. 1970.
- [141] VETTERLI, M.; HERLEY, C. Wavelets and filter banks: theory and design. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 40, n. 9, p. 2207 – 2232, sep 1992. ISSN 1053-587X.
- [142] YAN, B.; MIYAMOTO, A.; BRÜHWILER, E. Wavelet transform-based modal parameter identification considering uncertainty. *Journal of Sound and Vibration*, v. 291, n. 1-2, p. 285–301, March 2006.

- [143] LARDIES, J.; TA, M.; BERTHILLIER, M. Modal parameter estimation based on the wavelet transform of output data. *ARCHIVE OF APPLIED MECHANICS*, v. 73, n. 9-10, p. 718–733, June 2009. ISSN 0939-1533.
- [144] MALLAT, S. *A Wavelet tour of signal processing, The Sparse Way 3rd Edition*. Burlington, MA, USA: SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009. 832 p.
- [145] SEJDIC, E.; DJUROVIC, I.; STANKOVIC, L. Quantitative performance analysis of scalogram as instantaneous frequency estimator. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 56, n. 8, p. 3837 –3845, aug. 2008. ISSN 1053-587X.
- [146] CHEN, S.; LIU, J.; LAI, H. Wavelet analysis for identification of damping ratios and natural frequencies. *Journal of Sound and Vibration*, v. 323, n. 1-2, p. 130–147, June 2009.
- [147] MOORTELE, I. D.; MUNDAY, S. A.; HOOD, A. W. Wavelet analysis: the effect of varying basic Wavelet parameters. *Solar Physics - Kluwer Academic Publishers*, v. 222, p. 203–228, 2004.
- [148] KIJIEWSKI, T.; KAREEM, A. Wavelet transforms for system identification in civil engineering. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 18, p. 339–355, 2003.
- [149] RUEDA, J.; ERLICH, I. Enhanced wavelet-based method for modal identification from power system ringdowns. In: *Power-Tech, 2011 IEEE Trondheim*. [S.l.: s.n.], 2011.
- [150] HUANG, S.-J.; HSIEH, C.-T.; HUANG, C.-L. Application of morlet wavelets to supervise power system disturbances. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, v. 14, n. 1, p. 235 –243, jan 1999. ISSN 0885-8977.
- [151] RUEDA, J. L.; JUAREZ, C. A.; ERLICH, I. Wavelet-based analysis of power system low-frequency electromechanical oscillations. *Power Systems, IEEE Transactions on*, PP, n. 99, p. 1, 2011. ISSN 0885-8950.
- [152] HUR, K.; SANTOSO, S. Estimation of system damping parameters using analytic wavelet transforms. *Power Delivery, IEEE*

- Transactions on*, v. 24, n. 3, p. 1302 –1309, july 2009. ISSN 0885-8977.
- [153] WU Z., H.-N. On the filtering properties of the Empirical Mode Decomposition. *Advances in Adaptative Data Analysis, World Scientific Publishing Company*, v. 2, n. 4, p. 397–414, 2010.
- [154] WANG G., C.-X. Q. F. W. Z. H. N. On Intrinsic Mode Function. *Advances in Adaptative Data Analysis, World Scientific Publishing Company*, v. 2, n. 3, p. 277–293, 2010.
- [155] RAO A.R., H.-E.-C. *Hilbert-Huang Transform Analysis of Hydrological and Environmental Time Series*. Dordrecht, Netherlands: Springer, Water Science and Technology Library, Vol. 60, 2008. 248 p.
- [156] FLANDRIN, P.; RILLING, G.; GONCALVES, P. Empirical mode decomposition as a filter bank. *Signal Processing Letters, IEEE*, v. 11, n. 2, p. 112 – 114, feb. 2004. ISSN 1070-9908.
- [157] WU Z., H.-N. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method. *Proc. Royal Society*, v. 460, n. A, p. 1597–1611, 2004.
- [158] RILLING, G.; FLANDRIN, P. One or two frequencies? the empirical mode decomposition answers. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, v. 56, n. 1, p. 85 –95, jan. 2008. ISSN 1053-587X.
- [159] FELDMAN, M. Analytical basics of the emd: Two harmonics decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 23, n. 7, p. 2059 –2071, October 2009.
- [160] HUANG N.E., S.-Z.-L. S. R. A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, v. 31, p. 417–457, 1999.
- [161] RILLING, G.; FLANDRIN, P. on the influence of sampling on the empirical mode decomposition. In: *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2006. ICASSP 2006 Proceedings. 2006 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 3, p. III. ISSN 1520-6149.

- [162] STEVENSON, N.; MESBAH, M.; BOASHASH, B. A sampling limit for the empirical mode decomposition. In: *Signal Processing and Its Applications, 2005. Proceedings of the Eighth International Symposium on*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2, p. 647 – 650.
- [163] WU Z., H.-N. Ensemble Empirical Mode Decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis, World Scientific Publishing Company*, v. 1, n. 1, p. 1–41, 2009.
- [164] GLEDHILL, R. J. *Methods for investigating conformational change in biomolecular simulations*. Tese (Doutorado) — The University of Southampton.
- [165] SENROY, N.; SURYANARAYANAN, S.; RIBEIRO, P. An improved Hilbert-Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 22, n. 4, p. 1843 –1850, nov. 2007. ISSN 0885-8950.
- [166] SENROY, N. Generator coherency using the Hilbert-Huang transform. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 4, p. 1701 –1708, nov. 2008. ISSN 0885-8950.
- [167] BROWNE, T. et al. A comparative assessment of two techniques for modal identification from power system measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 3, p. 1408–1415, Aug. 2008. ISSN 0885-8950.
- [168] CEXUS J.C., B.-A. O. Teager-Huang Analysis Applied to Sonar Target Recognition. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SIGNAL PROCESSING*, v. 1, n. 1, p. 1–5, 2004. ISSN 1304-4494.
- [169] CEXUS J.C., B.-A. O. Nonstationary Signals Analysis by Teager-Huang Transform (tht). *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006)*, p. 1–5, September 2006.
- [170] LI H., Z.-Y.; ZHENG, H. Bearing fault detection and diagnosis based on order tracking and teager-huang transform. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing, World Scientific Publishing Company*, v. 7, n. 5, p. 643–663, 2009.

- [171] LI H., Z.-Y.; ZHENG, H. Bearing fault detection and diagnosis based on order tracking and teager-huang transform. *JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY*, Springer, v. 24, n. 3, p. 811–822, 2010.
- [172] DAUBECHIES, I.; LU, J.; WU, H. Synchrosqueezed wavelet transforms: a tool for empirical mode decomposition. <http://arxiv.org/abs/0912.2437>, p. 1–23, 2009.
- [173] ELÉTRICA, C. C. de Pesquisa de E. *Anatem: Análise de Transitórios Eletromecânicos - Manual do Usuário*. [S.l.]: <http://www.cepel.br/>, 2005.
- [174] AGUIRRE, L. Quantitative measure of modal dominance for continuous systems. *Proc. of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, p. 2405–2410 vol.3, Dec 1993.
- [175] PRIOSTE, F.; SILVA, A.; DECKER, I. Power system control based on the identification of oscillation modes. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- [176] PRIOSTE, F.; SILVA, A.; DECKER, I. Avaliação de métodos de identificação de modos eletromecânicos em sistemas elétricos de potência. In: *CBA, 2010 Congresso Brasileiro de Automática - Bonito, MS*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8.
- [177] DECKER, I. et al. System Wide Model Validation of the Brazilian Interconnected Power System. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE Minneapolis*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, n. 1, p. 1–8. ISSN 1944-9925.
- [178] PRIOSTE, F.; SILVA, A.; DECKER, I. Monitoring Oscillation Modes of the Brazilian Interconnected Power System Using Ambient Data. In: *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–7.
- [179] DECKER, I. C. et al. Experience of Wams Development and Applications in Brazil. *Power System Computation Conference, 2011 Stockholm*, 2011.
- [180] ZHOU, N. et al. Electromechanical mode online estimation using regularized robust rls methods. *Power Systems, IEEE Trans. on*, v. 23, n. 4, p. 1670–1680, nov. 2008. ISSN 0885-8950.

- [181] ZHOU, N.; TRUDNOWSKI, D.; PIERRE, J. Mode initialization for on-line estimation of power system electromechanical modes. *Power Systems Conference and Exposition, 2009. IEEE/PES*, p. 1 –8, march 2009.
- [182] WIES, R.; PIERRE, J.; TRUDNOWSKI, D. Use of least mean squares (lms) adaptive filtering technique for estimating low-frequency electromechanical modes in power systems. *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, p. 1863–1870 Vol.2, June 2004.
- [183] APKARIAN, P.; GAHINET, P.; BECKER, G. Self-scheduled H_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example. *Automatica*, p. 1251–1261, 1995.
- [184] LIND, R. Linear Parameter-Varying Modeling and Control of Structural Dynamics with Aerothermoelastic Effects. *JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL, AND DYNAMICS*, p. 733–739, Aug 2002.
- [185] THOMAS, D. B. et al. Gaussian random number generators. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, v. 39, n. 4, p. 1– 38, 2007. ISSN 0360-0300.
- [186] PARK, S. K.; MILLER, K. W. Random number generators: Good ones are hard to find. *Communications of the ACM*, v. 31, n. 10, p. 1192 – 1201, oct 1988.
- [187] KLEIN, M.; ROGERS, G.; KUNDUR, P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 6, n. 3, p. 914 –921, aug 1991. ISSN 0885-8950.
- [188] ONS. Análise da perturbação do dia 04/02/2011 à 00h21min envolvendo os estados da região nordeste. *ONS RE 3/0032/2011.*, 2011.
- [189] ANDERSON, B. D. O.; MOORE, J. B. *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. New Jersey, USA: Prentice-Hall,, 1990. 380 p.
- [190] GEROMEL, J. C. *Methods and Techniques for Decentralized Control Systems: Analysis and Design*. Milano,Italy: Clup, 1987.

- [191] COSTA, A. S.; FREITAS, F.; SILVA, A. e. Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 12, n. 1, p. 144–152, Feb 1997. ISSN 1558-0679.
- [192] FREITAS, F. D. *Ajuste de estabilizadores de sistemas de potencia via controle ótimo com restrições estruturais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina.
- [193] BARBOSA, K. A. *Técnicas LMI para sistemas com Restrições Algébricas no Estado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina.
- [194] A., T. Abordagem lmi para problemas de controle com funções de lyapunov dependente de parâmetros. *XII Congresso Brasileiro de Automática, Uberlândia, MG, Mini-Curso.*, 1998.
- [195] KUO, C.-H.; FANG, C.-H. An lmi approach to admissibilization of uncertain descriptor systems via static output feedback. *American Control Conference*, Pergamon Press, Inc., Denver - Colorado, USA, p. 5104–5109, 2003.
- [196] CRUSIUS, C. A. R.; TROFINO, A. Sufficient lmi conditions for output feedback control problems. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, v. 44, n. 5, p. 1053–1057, 1999.
- [197] CHOW, J. et al. Power system damping controller design-using multiple input signals. *Control Systems Magazine, IEEE*, v. 20, n. 4, p. 82–90, Aug 2000. ISSN 0272-1708.
- [198] DOTTA, D.; SILVA, A. e; DECKER, I. Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 24, n. 1, p. 208 –216, feb. 2009. ISSN 0885-8950.
- [199] PATEL, R. V.; MUNRO, N. *Multivariable System Theory and Design*. Oxford, U.K.: Pergamon, 1982. - p.
- [200] V., B. J.; S., L. A.; L., O. M. A nonsmooth, nonconvex optimization approach to robust stabilization by static output feedback and low-order controllers. *In Proceedings IFAC Symposium on Robust Control Design*, June 2003.

- [201] V., B. J.; S., L. A.; L., O. M. A robust gradient sampling algorithm for nonsmooth, nonconvex optimization. *SIAM Society for Industrial and Applied Mathematics*, v. 15, n. 3, p. 751–779, 2005.
- [202] V., B. J. et al. Stabilization via nonsmooth, nonconvex optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 51, n. 11, p. 1760–1769, November 2006. ISSN 0018-9286.
- [203] V., B. J. et al. Hifoo - a package for fixed-order controller design and hinf optimization. In *5th IFAC Symposium on Robust Control Design*, 2006.
- [204] GUMUSSOY, S.; OVERTON, M. Fixed-order h_∞ controller design via hifoo, a specialized nonsmooth optimization package. In: *American Control Conference, 2008*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 2750 – 2754. ISSN 0743-1619.
- [205] MARTINS, N.; LIMA, L. T. G. Eigenvalue and frequency domain analysis of small-signal electromechanical stability problems. *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Method for System Dynamic Performance*, p. 17–33, 1989.
- [206] BANEJAD, M.; LEDWICH, G. Correlation based mode shape determination of a power system. In: *Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), 2002 IEEE International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 4, p. IV–3832 –IV–3835. ISSN 1520-6149.
- [207] TRUDNOWSKI, D. J. Estimating electromechanical mode shape from synchrophasor measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, v. 23, n. 3, p. 1188–1195, Aug. 2008. ISSN 0885-8950.
- [208] PAL, B.; CHAUDHURI, B. *Robust Control in Power Systems*. New York, USA: Springer, 2005.

ANEXO A – SISTEMAS LINEARES

A tendência de se modelar e analisar sistemas dinâmicos de grande porte e complexidade vem aumentando a cada dia, devido principalmente à necessidade de atender seus requisitos de desempenho e precisão.

Estes sistemas possuem muitas vezes múltiplas entradas e saídas e uma ferramenta poderosa capaz de lidar com tais estruturas/requisitos é a análise via espaço de estados, onde sistemas lineares ou não lineares linearizados em seus pontos de equilíbrio, sejam eles variantes ou invariantes no tempo podem ser analisados.

A teoria de sistemas lineares fornece várias ferramentas para análise e projeto de controladores, que são frequentemente usadas para alocação e escolha de sinais de realimentação em SEP. A partir dela pode-se estabelecer os fatores de participação [8, 9], índices de observabilidade e controlabilidade, que juntos servem para calcular os resíduos modais, sendo que suas utilizações auxiliam nestas escolhas.

A realimentação de todos os estados permite que os pólos do sistema em malha fechada sejam alocados em qualquer região do plano complexo, mas esta afirmação é válida se e somente se o sistema em malha aberta for controlável.

Controlabilidade e observabilidade são propriedades estruturais dos sistemas lineares, que quando satisfeitas possibilitam o projeto de controladores de tal forma que os pólos do sistema em malha fechada possam ser escolhidos arbitrariamente pelo projetista.

Controlabilidade: Considere um sistema dinâmico $\dot{x} = Ax + Bu$. Diz-se que o par (A, B) é controlável em um instante t_0 se for possível, por meio de um vetor ou matriz de controle, sem restrições em seus elementos, transferir o sistema de qualquer estado inicial $x(t_0)$ para qualquer outro estado em um intervalo de tempo finito.

A controlabilidade do par (A, B) pode ser testada verificando o posto da matriz de controlabilidade M_c , definida:

$$M_c = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] \quad (\text{A.1})$$

Se o sistema em malha aberta não for controlável, uma outra condição para que o mesmo possa ser estabilizado é que os autovalores não controláveis sejam estáveis e portanto localizados no semi-plano esquerdo do plano complexo, se isto ocorre o sistema é estabilizável.

Observabilidade: Um sistema dinâmico na forma de espaço de estados ou o par (A, C) é observável se todo estado inicial $x(t_0)$ puder ser determinado a partir do conhecimento de sua entrada e saída durante um intervalo de tempo finito.

A observabilidade do par (A, C) pode ser testada verificando o posto da matriz de observabilidade M_o (A.2):

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Caso o sistema não seja observável ele ainda pode ser detectável se seus autovalores não observáveis forem estáveis.

Conhecendo as propriedades estruturais do sistema, se ele for estabilizável e detectável, sabe-se que existem estados que não são influenciados pelo processo de realimentação.

Considere o sistema *MIMO* (Multi-Input Multi-Output) (A.3) com a realimentação de estados definida por (A.4). O sistema em malha fechada pode ser escrito na forma (A.5).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

$$u = -Kx \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - BK)x \\ y &= (C - DK)x \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

O uso de controladores que empregam realimentação de estados é um procedimento apropriado para a estabilização de sistemas

Lema A.1. *Seja K uma matriz de dimensão apropriada. Então o par (A, B) é controlável (estabilizável) se e somente se $(A - BK, B)$ for controlável (estabilizável)*[67].

Quando o sinal de controle é construído com informações de todas as variáveis de estado diz-se que a lei de controle é do tipo rea-

limentação de estados. Quando o sinal de controle é construído com informações de um subconjunto de variáveis de estado, chamadas de variáveis de saída, diz-se que o controle é por realimentação de saída. Neste caso, usa-se: $u = -Ky$ sendo $y = Cx$.

Em geral, a maioria das variáveis de estado não são mensuráveis. Neste caso, torna-se prática ou economicamente inviável medi-las. Assim, a realimentação de sinais de saída é a mais comum na prática.

A escolha dos melhores sinais a serem usados na realimentação de controladores pode ser feita através de técnicas de cálculo de fatores de participação, resíduos modais ou índices de controlabilidade e observabilidade.

Uma desvantagem dos fatores de participação em relação aos resíduos modais é que as informações obtidas através deles são fornecidas apenas pelas sensibilidades dos estados através do produto de autovetores à direita e à esquerda.

A vantagem de se usar os resíduos de funções de transferência é a de poder considerar as matrizes ou vetores B e C , juntamente com os autovetores à direita e à esquerda para poder identificar efetivamente a localização mais adequada para a inserção de controladores (controlabilidade), além de se poder também escolher um sinal adequado de realimentação no sistema (observabilidade).

Para se ter tais informações, os índices de controlabilidade e observabilidade modais, que formam os resíduos, vêm sendo utilizados em sistemas de potência para tal finalidade, considerando informações sobre a entrada e saída de controladores e possibilitando a escolha de geradores ou barras candidatas a receberem controladores adicionais que apresentam melhor efetividade para amortecerem oscilações indesejadas.

A função de transferência do sistema (A.3) é dada por (A.6). Excluindo-se a matriz de transmissão direta D do sistema e fazendo uso da relação de ortogonalidade dos autovetores a direita e a esquerda, $VW = I$, chega-se a (A.7), [3].

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned}
G(s) &= C(sI - A)^{-1}B \\
&= CVW(sI - A)^{-1}VWB \\
&= CV[V^{-1}(sI - A)W^{-1}]^{-1}WB \\
&= CV(sI - \Lambda)^{-1}WB \\
&= \sum_{i=1}^n \frac{Cv_i w_i' B}{s - \lambda_i} \\
&= \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i}
\end{aligned} \tag{A.7}$$

Onde R_i é conhecido como resíduo modal, resultado do produto da observabilidade modal Cv_i e da controlabilidade modal $w_i' B$.

Para serem controláveis, os modos do sistema devem satisfazer $w_i' B \neq 0, \forall i$ e para serem observáveis $Cv_i \neq 0, \forall i$

Pode-se constatar através de (A.7) que modos com pequeno amortecimento influenciam a magnitude da função de transferência $G(s)$, que ainda são ponderados pelos respectivos resíduos. Quanto maiores os módulos dos resíduos melhores são as indicativas para a inclusão de um controlador a ser inserido no sistema.

Assim, quanto maior o módulo do resíduo, menor o esforço de controle. Já as respectivas fases dos resíduos estão associadas aos ângulos de compensação a serem inseridos pelos controladores [208].

ANEXO B – COMPLEMENTO DE SCHUR E LEMA DE FINSLER

O Complemento de Schur é uma ferramenta básica utilizada na manipulação de desigualdades matriciais que é capaz de transformar, mediante determinadas condições, desigualdades não-lineares em LMIs.

Lema B.1. *Sejam Q , R e S matrizes de dimensões compatíveis, com Q e R simétricas e S afim em x , então as seguintes relações são equivalentes [66]:*

$$R(x) > 0, \quad Q(x) - S(x)R(x)^{-1}S(x)' > 0 \quad (\text{B.1a})$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S(x)' & R(x) \end{bmatrix} > 0 \quad (\text{B.1b})$$

A inequação (B.1a) não é afim em x . No entanto, as desigualdades (B.1a) e (B.1b), que é uma LMI, são equivalentes. Para satisfazer (B.1a) e (B.1b) deve-se ter $Q > 0$ e $R > 0$ como condições necessárias, porém não suficientes [66]. O enunciado apresentado é válido apenas para desigualdades *estritas*, i.e., ($\Gamma > 0$), o caso não estrito ($\Gamma \geq 0$) pode ser encontrado em [66].

O Lema Finsler é útil pois permite que restrições de igualdade possam ser inseridas em uma única desigualdade que pode ser resolvida via LMIs. Sua utilização aplica-se a estudos de estabilidade e estabilizabilidade quadrática de sistemas descritores na forma algébrico-diferencial, (7.8) e (7.11) respectivamente, evitando a eliminação de variáveis algébricas na formulação LMI.

Lema B.2. *Dada uma matriz simétrica Ψ e uma matriz $C_a \in \mathbb{R}$, de dimensões compatíveis, e seja X uma matriz tal que $C_a X = 0$, então tem-se que:*

$$X'\Psi X < 0, \quad \forall X : C_a X = 0 \quad (\text{B.2a})$$

se e somente se $\exists L$ tal que

$$\Psi + LC_a + C_a' L < 0 \quad (\text{B.2b})$$